

ISSN 1729-7516

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 4(52), ДЕКАБРЬ 2012

Издается с января 2000 г.

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.ф.-м.н. БАТЫРБЕКОВ Э.Г. – заместитель главного редактора,
д.ф.-м.н. ЖОТАБАЕВ Ж.Р. – заместитель главного редактора, д.т.н. БАТЫРБЕКОВ Г.А.,
БЕЛЯШОВА Н.Н., к.ф.-м.н. ВОЛКОВА Т.В., к.б.н. КАДЫРОВА Н.Ж., к.ф.-м.н. КЕНЖИН Е.А.,
к.ф.-м.н. КОЗТАЕВА У.П., д.ф.-м.н. КОПНИЧЕВ Ю.Ф., д.г.-м.н. КРАСНОПЕРОВ В.А., ЛУКАШЕНКО С.Н.,
д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.г.-м.н. НУРМАГАМБЕТОВ А.Н., д.б.н. ПАНИН М.С.,
к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е., д.т.н. САТОВ М.Ж., д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П.

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

4(52) ШЫҒАРЫМ, ЖЕЛТОҚСАН, 2012 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 4(52), DECEMBER 2012

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ON-LINE ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ ДЛЯ РЕАКТОРОВ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА: МЕТОДЫ, АППАРАТУРА, ДОСТИЖЕНИЯ. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ СЕНСОРОВ ДЛЯ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКОВ TORE SUPRA И JET.....	4
Большакова И., Чеканов В., Дюран И., Голяка Р., Коноплева Р., Коварик К., Куликов С., Курнаев В., Макидо Е., Шурыгин Ф., Васильевский И., Виерербл Л., Ерашок В., Загачевский Ю.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ЖИДКИМ ЛИТИЕМ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	12
Барсуков Н.И., Гордиенко Ю.Н., Заурбекова Ж.А., Кенжин Е.А., Кульсартов Т.В., Понкратов Ю.В., Тажибаева И.Л., Тулубаев Е.Ю.	
ВОЗМОЖНОСТИ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ С ВОДНЫМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕМ	20
Котов В.М., Витюк Г.А., Сураев А.С.	
ДИНАМИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ В КВАРК-ГЛЮОННОМ КАСКАДЕ	28
Темиралиев А.Т., Данлыбаева А.К.	
НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН И КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ.....	33
Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.	
КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ, ФОРМИРУЮЩИЕСЯ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РАЙОНАХ	42
Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.	
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В РАЙОНЕ ГИНДУКУША И ИХ СВЯЗЬ С ГЛУБОКОФОКУСНОЙ СЕЙСМИЧНОСТЬЮ	53
Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.	
В.И. ВЕРНАДСКИЙ И МОНИТОРИНГ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ	62
Васильев А.П.	

УДК 533.9.08; 621.039.66

**ON-LINE ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ ДЛЯ РЕАКТОРОВ
УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА: МЕТОДЫ, АППАРАТУРА, ДОСТИЖЕНИЯ.
ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ СЕНСОРОВ
ДЛЯ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКОВ TORE SUPRA И JET**

¹Большакова И., ²Чеканов В., ³Дюран И., ¹Голяка Р., ²Коноплева Р., ³Коварик К., ⁴Куликов С., ⁵Курнаев В.,
¹Макидо Е., ¹Шурыгин Ф., ⁵Васильевский И., ⁶Виерербл Л., ¹Ерашок В., ¹Загачевский Ю.

¹Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

²Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Россия

³Институт физики плазмы AS CR, Ассоциация EURATOM-IPP.CR, Прага, Чехия

⁴Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁵Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

⁶Институт ядерных исследований, Реж, Чехия

Исследование материалов для систем диагностики и элементов конструкции является важной и актуальной задачей для fusion реакторов нового поколения. В настоящее время исследователи вынуждены проводить испытания материалов в различных ядерных исследовательских установках, условия в которых, во-первых, отличаются между собой, а, во-вторых, далеко не в полной мере соответствуют условиям fusion реакторов нового поколения.

Опыт разработки аппаратуры для on-line тестирования материалов и сенсоров магнитной диагностики в радиационных условиях, приведенный в данной статье, может быть использован для тестирования широкого круга материалов в Казахстанском токамаке КТМ в условиях, приближенных к условиям ITER и последующих fusion реакторов.

ВВЕДЕНИЕ

У разработчиков энергетических установок будущего не вызывает сомнения тот факт, что материалы, приборы и элементы конструкций, предназначенные как для fusion энергетики, так и для fission энергетики должны тестироваться в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации в соответствующих установках.

Материаловедческие проблемы ядерных реакторов 4-го поколения призвана решать исследовательская установка MaRIE (Matter-Radiation Interactions in Extremes) в Лос-Аламосской Национальной Лаборатории США, основным назначением которой является исследование материалов в процессе их облучения.

КТМ (Казахстанский Токамак Материаловедческий) призван решать материаловедческие проблемы для fusion реакторов нового поколения.

В токамаках среди всех типов диагностик магнитная диагностика является одной из самых важных, поскольку плазма удерживается магнитным полем сложной конфигурации. Поэтому к магнитной диагностике предъявляются высокие требования по точности и надежности. Точное измерение магнитных полей необходимо для эффективной работы реакторов нового поколения: для контроля плазмы в режиме real time и обработки других диагностических сигналов, которые касаются ключевых характеристик плазмы.

При этом проблемы, связанные с сенсорами магнитного поля, значительно сложнее чем для струк-

турных материалов из-за необходимости сохранять не только механическую целостность, но и намного более чувствительные физические свойства.

В связи с этим тестирование материалов и приборов для диагностики магнитного поля должно проходить в условиях подобных рабочим условиям токамака. Среди факторов внешнего воздействия на средства магнитной диагностики следует отметить прежде всего радиационное воздействие нейтронных потоков, а также высокий вакуум и температуру.

РАДИАЦИОННЫЕ ПОЛЯ В СОВРЕМЕННЫХ ТОКАМАКАХ В МЕСТАХ РАЗМЕЩЕНИЯ МАГНИТНЫХ СЕНСОРОВ

Радиационная нагрузка в ITER ожидается значительной по сравнению с существующими установками. Ожидаемый общий поток нейтронов в ITER составит около $2,5 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а максимальный поток нейтронов у первой стенки составит $4,4 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [1].

В общей сложности 1700 магнитных сенсоров будут установлены в различных местах ITER (рисунок 1). При этом они должны обладать низкой интенсивностью дегазации для совместимости с высоким вакуумом. Кроме того, они должны быть способны выдерживать температуры от 100°C до 250°C. Радиационная стойкость является новой задачей, с которой должно столкнуться термоядерное сообщество во время разработки магнитной диагностики для ITER.

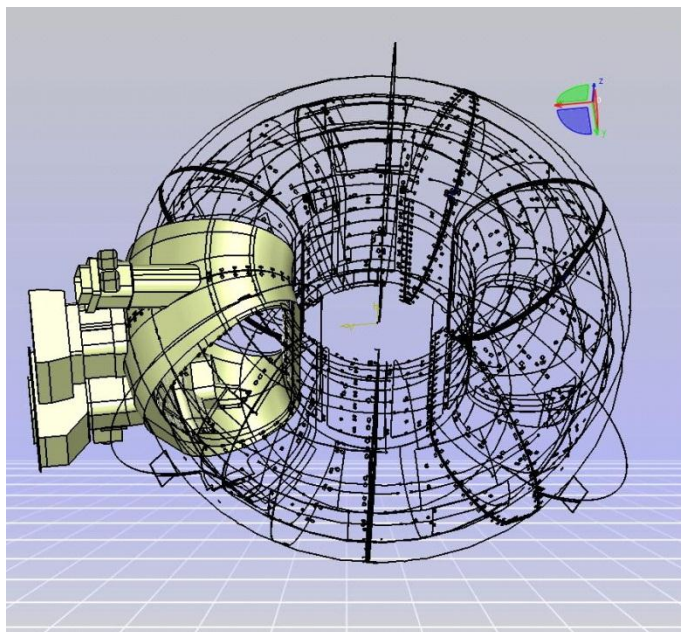


Рисунок 1. Обзор размещения магнитных датчиков в ITER (1700 датчиков)

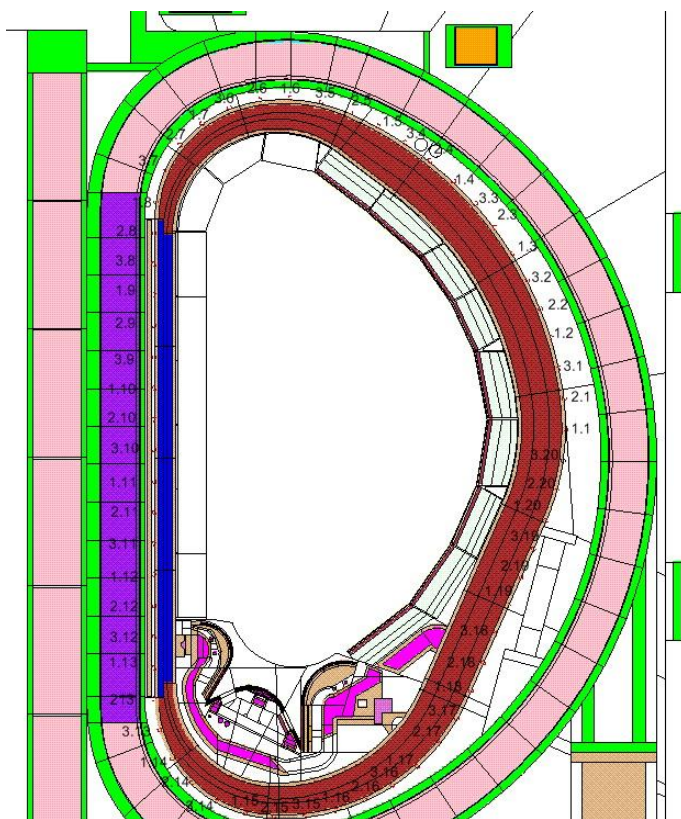


Рисунок 2. Ex-vessel размещение steady-state сенсоров в ITER

В системах магнитной диагностики как действующих современных токамаков, так и ITER предусмотрено использование традиционных индуктивных методов, основанных на использовании pick-up coils и интеграторов. В существующих реакторах, в которых длительность импульсов магнитного поля не превышает нескольких секунд, индуктивные пре-

образователи удовлетворительно выполняют свою функцию.

Проблема реакторов нового поколения состоит в том, что с возрастанием длительности импульса от нескольких десятков до 3600 сек, как это предусмотрено в ITER, точность интегрирования резко уменьшается, и индуктивные преобразователи не позволя-

ют получить необходимую точность измерения квазистационарного магнитного поля.

Другая проблема заключается в том, что радиационное поле в ИТЕР будет намного жёстче, чем в современных установках. Высокие уровни проникающего излучения могут существенно влиять на точность измерения индуктивных преобразователей посредством радиационно-индуцированных эффектов (RIEMF, RITES и др.) [2].

Для решения этих проблем нами было предложено дополнить систему магнитной диагностики ИТЕР гальваномагнитными преобразователями, а именно полупроводниковыми сенсорами Холла. В отличие от индуктивных преобразователей они не имеют ограничений относительно длительности импульса и с достаточно высокой точностью измеряют как высокочастотные, так и постоянные магнитные поля, поэтому являются наиболее пригодными для измерения steady-state магнитных полей в реакторах нового поколения с большой длительностью импульса [3].

Задача состоит в том, чтобы обеспечить достаточную радиационную стойкость полупроводниковых сенсоров в потоках высокоэнергетических нейтронов и работоспособность при повышенных температурах в реакторе.

Например, в ИТЕР в местах, предназначенных для размещения steady-state сенсоров (рисунок 2), рабочая температура steady-state сенсоров находится на уровне 120°C, а температура их выживания составляет 220°C и определяется условиями отжига камеры для ее дегазации. Радиационные нагрузки в этих местах определяются флюенсом нейтронов за время жизни ИТЕР и достигают максимального значения $F = 1,0 \cdot 10^{18} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ при интенсивности потока $7,7 \cdot 10^{10} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ХОЛЛОВСКИЕ СЕНСО- РЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИХ ТЕСТИРОВАНИЯ

В Лаборатории Магнитных Сенсоров (ЛМС НУЛП) совместно с Центром нанотехнологий и кафедрой физики плазмы НИЯУ «МИФИ» разработаны и изготовлены радиационно-стойкие материалы и сенсоры магнитного поля на основе полупроводниковых гетероструктур InSb/i-GaAs и InAs/i-GaAs.

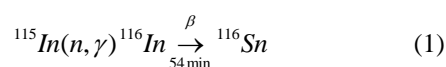
Полупроводниковые холловские сенсоры являются перспективными для повышения точности измерения магнитного поля в термоядерных реакторах. В том числе steady-state магнитного поля в реакторах типа ИТЕР, в которых длительность импульса горения плазмы является значительной [1].

Однако, использование полупроводниковых сенсоров в термоядерных реакторах выдвигает требования стабильности их параметров в радиационных и температурных условиях этих установок.

Технологические методы повышения радиационной стойкости сенсоров основаны на технологиях легирования полупроводниковых материалов ком-

плексом легирующих примесей (донорных, извалентных, редкоземельных) до оптимальной исходной концентрации свободных носителей заряда (n_{opt}), а также на технологиях радиационного модифицирования их свойств.

При этом учитывается, что при облучении в полупроводниковом материале (например в InSb) происходят одновременно два взаимно компенсирующих процесса: (1) генерация радиационных дефектов акцепторного типа быстрыми нейтронами и (2) генерация доноров за счет реакций трансмутационного легирования при взаимодействии медленных (а также резонансных и промежуточных) нейтронов с атомами индия основного вещества с образованием олова, которое для InSb является донорной примесью:



Скорость изменения концентрации носителей заряда в материале сенсоров под влиянием облучения потоком нейтронов определяется как $\Delta n / \Delta F \approx \alpha - \beta n$, где n – концентрация носителей заряда в облученном материале, F – флюенс нейтронов, α – коэффициент введения доноров (или акцепторов) за счет ядерного легирования медленными нейтронами, β – сечение образования радиационных дефектов акцепторного (или донорного) типа быстрыми нейтронами. Для оптимальной исходной концентрации $\alpha \approx \beta n$, что соответствует $\Delta n / \Delta F \approx 0$.

При оптимальном составе полупроводникового материала, за счет баланса этих двух механизмов и с учетом соотношения между быстрыми и медленными нейтронами в потоке, можно минимизировать дрейф параметров сенсоров при облучении до такого уровня, который затем поддается коррекции электроникой и программным обеспечением магнитоизмерительной аппаратуры.

Наиболее близким по спектру нейтронов к термоядерным реакторам типа ИТЕР является импульсный быстрый реактор ИБР-2 (отношение потока медленных нейтронов к потоку быстрых составляет 0.7, в ИТЕР – 0.8). В исследовательских водо-водяных реакторах, например в LVR-15 и ВВР-М, это отношение достигает 10÷18. Поэтому в процессе измерений приходится пользоваться кадмиевыми экранами, которые задерживают лишь часть медленных нейтронов, а именно тепловые нейтроны, но пропускают резонансные нейтроны, которые производят в материале сенсоров такие же трансмутационные реакции как и тепловые нейтроны.

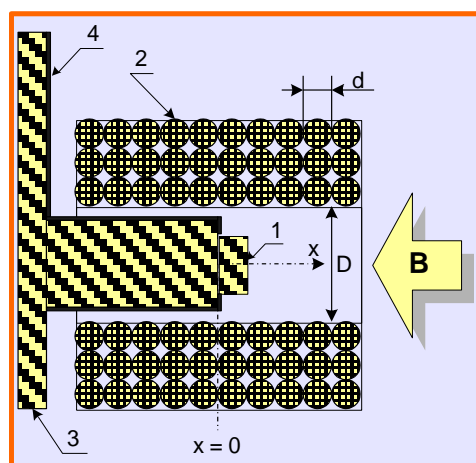
Испытания радиационной стойкости полупроводниковых материалов и сенсоров проводились в нейтронных потоках исследовательских ядерных реакторов ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна), ВВР-М (ПИЯФ, Гатчина) и LVR-15 (Rež, Czech Republic).

Для проведения испытаний до высоких флюенсов нейтронов в ЛМС была создана специальная

тестовая аппаратура, позволяющая проводить измерения параметров сенсоров в режиме реального времени во время их облучения в каналах ядерных реакторов (on-line измерения). Она включает оснастку для размещения тестируемых образцов в канале реактора, источник магнитного поля, управляющую электронику, линии связи и программное обеспечение, позволяющее получать информацию по сети интернет за тысячи километров от места проведения испытаний на протяжении нескольких месяцев длительности эксперимента [4].

Проведенные испытания показали работоспособность полупроводниковых сенсоров в потоках нейтронов до самых высоких флюенсов $F = 3 \cdot 10^{18} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$, превышающих уровень максимальной радиационной нагрузки в местах размещения steady-state сенсоров в ITER. При этом, изменение чувствительности сенсоров при облучении нейтронами до флюенсов $10^{15} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$ составляет всего лишь 0,04%, при флюенсах $10^{16} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2} - 0,08\%$, при самых высоких флюенсах $10^{17} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2} \div 10^{18} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}$ дрейф чувствительности облученных сенсоров составляет всего лишь (5÷7)%.

Столь небольшой уровень дрейфа сигналов сенсоров под воздействием высокоэнергетических нейтронов можно корректировать электронными методами, которые были положены в основу магнитоизмерительной 3D аппаратуры, созданной для диагностики магнитного поля fusion реакторов нового поколения.

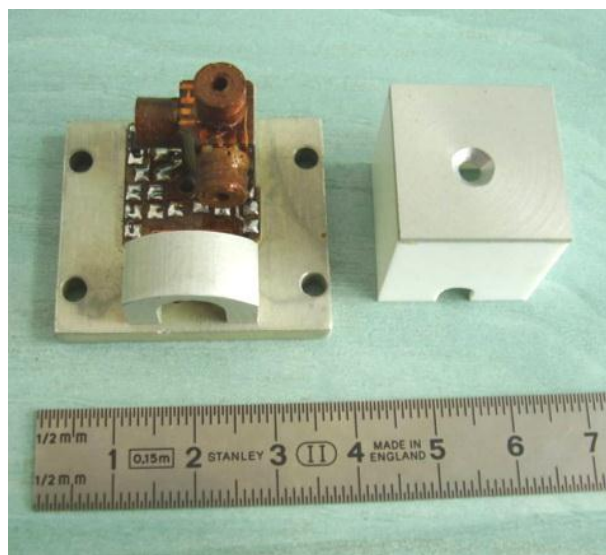


1 – холловский сенсор, 2 – катушка микросолоноида,
3 – основа, 4 – выводы, $D=1 \text{ мм}$ – внутренний диаметр соленоида,
 $d=0,05 \text{ мм}$ – диаметр медного провода,
 B – вектор индукции магнитного поля
а – структурная схема

МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКОВ НА ОСНОВЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ХОЛЛОВСКИХ СЕНСОРОВ

Изготовленная в MSL аппаратура для магнитной диагностики включает в себя 3D-зонд с радиационно-стойкими полупроводниковыми сенсорами и электронику с функцией in-situ самокалибровки.

В состав каждого 3D-зонда входят: три сенсора Холла и три микросолоноида диаметром $1 \div 2 \text{ мм}$, внутри которых расположены сенсоры, а также один термодиод. Микросолоноид создает магнитное поле определенной величины и вместе с расположенным внутри его сенсором образует интегрированный магнитометрический преобразователь (рисунок 3). Сенсоры Холла формируют выходные напряжения V_{HGx} , V_{HGy} , V_{HGz} , которые являются пропорциональными соответствующим составляющим магнитной индукции измеряемого поля B_x , B_y , B_z . Микросолоноиды выполняют две функции. В режиме измерения ими формируются напряжения V_{CLx} , V_{CLy} , V_{CLz} , которые пропорциональны соответствующим составляющим скорости изменения внешнего магнитного поля ΔB_x , ΔB_y , ΔB_z . В режиме калибровки микросолоноидами формируется тестовое магнитное поле B_{0x} , B_{0y} , B_{0z} величиной около 5 мТл. Это тестовое магнитное поле, создаваемое медной катушкой микросолоноида, не зависит от дозы радиации, а потому может использоваться для периодической калибровки чувствительности сенсоров.



б – фотография сборки 3D зонда

Рисунок 3. Интегрированный магнитометрический преобразователь

Разработанный алгоритм коррекции характеристик преобразования позволяет избежать проблемы формирования сильных тестовых магнитных полей, является эффективным относительно сколь угодно высоких значений измеряемых полей. Алгоритм основывается на трех принципах: одновременном ана-

лизе характеристики преобразования по интегральной и дифференциальной составляющим сигнала; частотном разнесении дифференциальной и интегральной составляющих сигнала; прогрессивном методе расчетов величин функции преобразования и измеряемого магнитного поля. Графическое пред-

ставление функции преобразования и измеряемых величин приведено на рисунок 4.

Функция преобразования измерительного контура представляется в виде полинома

$$U_{Ho} = \sum_{j=0}^n a_j \cdot B^j, \quad (2)$$

а алгоритм ее коррекции основывается на расчете системы уравнений

$$\begin{cases} U_{He}(B_x) = G \cdot U_{Ho}(B_x) \\ \frac{dU_{He}(B_x)}{dB} = G \cdot \frac{dU_{Ho}(B_x)}{dB} \end{cases} \quad (3)$$

где U_{Ho} , U_{He} – номинальное и измеренное значения холловского напряжения соответственно, B_x – значение индукции измеряемого поля, a_j – коэффициенты

полиномиального ряда, G – коэффициент дрейфа функции преобразования, который определяется в процессе тестовых измерений. Производные холловского напряжения по индукции магнитного поля dU_H / dB определяются в результате измерения дифференциального тестового поля микросолоноида. Погрешность коррекции составляет 0,1%.

Преимуществом принципа, положенного в основу работы аппаратуры, является возможность ее периодической калибровки без переустановки сенсоров (in-situ калибровка), и тем самым обеспечение коррекции чувствительности сенсоров в условиях длительного действия на них проникающей радиации.

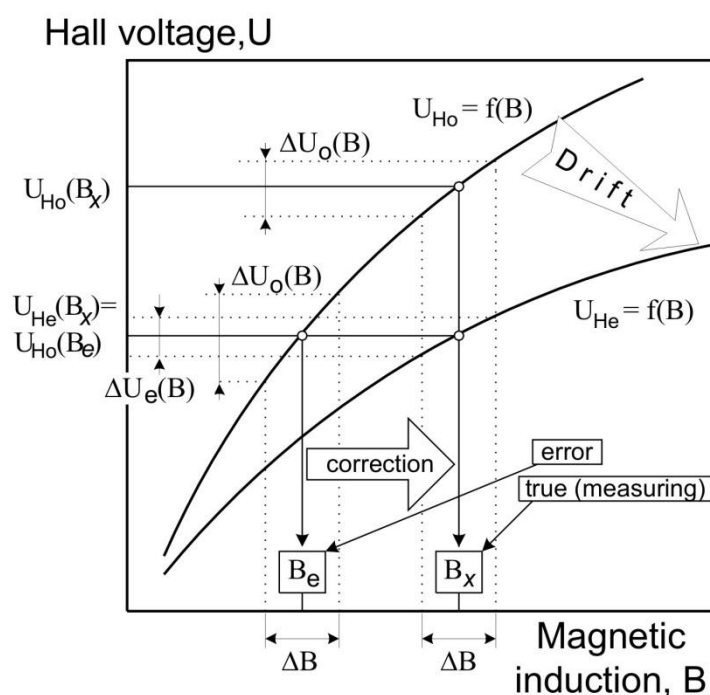


Рисунок 4. Алгоритм коррекции характеристики преобразования

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РЕАКТОРОВ TORE SUPRA И JET

Магнитоизмерительная аппаратура на основе радиационно-стойких холловских сенсоров была установлена и успешно использовалась в самых больших из действующих европейских реакторов TORE SUPRA и JET [5-7]. В отличие от индуктивных измерительных pick-up coils, радиационно-стойкие холловские сенсоры позволяют измерять магнитное поле в широком диапазоне частот, начиная от постоянных и квазистационарных полей до высокочастотных с частотой в сотни килогерц.

На рисунке 5 приведены результаты 3D измерения магнитного поля в эксперименте №34085 магнитного удержания плазмы в реакторе TORE SUPRA. Продолжительность квазистационарного магнитного поля составляет 30 сек. Магнитоизмерительная аппаратура на основе холловских сенсоров позволяет наблюдать тонкую структуру колебаний квазистационарного магнитного поля, величина которого управляется системой удержания плазмы таким образом, чтобы ее пространственное положение сохранялось в заданных пределах. Пример результатов измерения ортогональных компонент вектора магнитного поля в эксперименте №64416 с удержанием плазмы в реакторе JET приведен на рисунке 6.

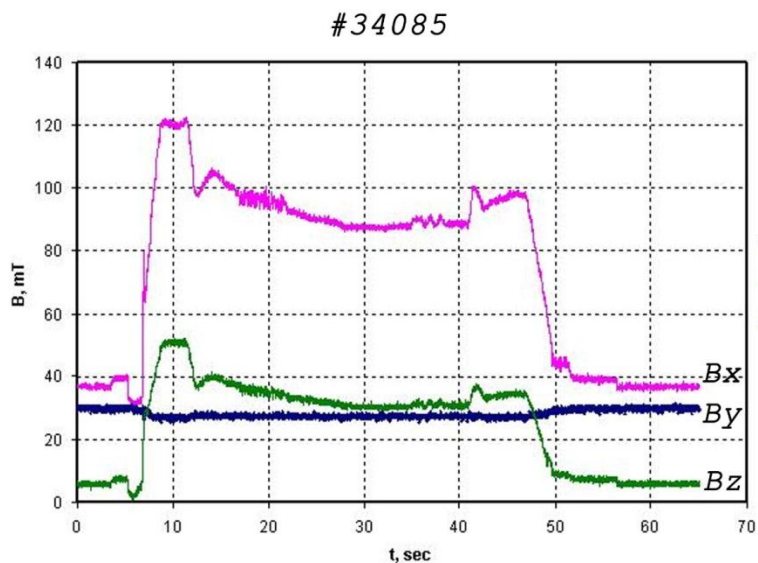


Рисунок 5. Результаты измерения магнитного поля в реакторе TORE SUPRA

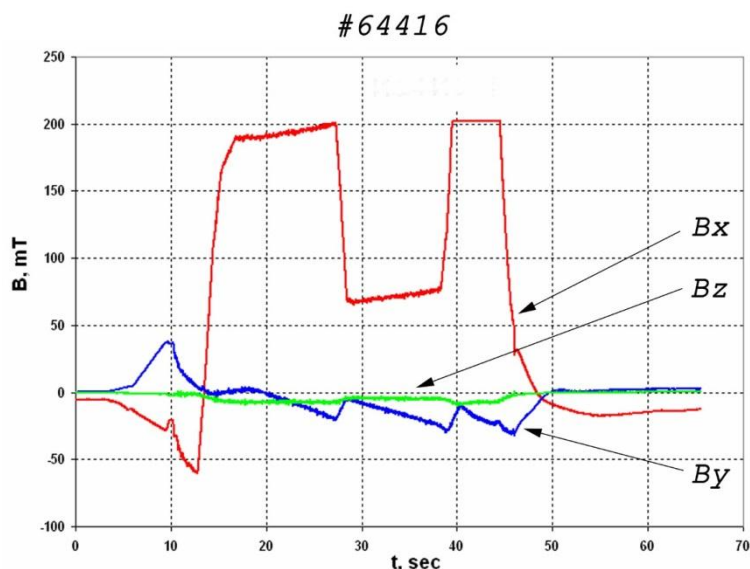


Рисунок 6. Результаты измерения магнитного поля в реакторе JET

В период дейтериевой сессии C27 на JET в 2009 г. шесть комплектов магнитоизмерительной аппаратуры использовались для диагностики магнитного поля. 3D зонды с холловскими сенсорами были установлены ex-vessel на механических опорных структурах, сконструированных и изготовленных Ассоциацией ENEA (CREATE) [7].

В процессе измерений была предусмотрена периодическая in-situ калибровка аппаратуры. Оценка погрешности калибровки, проведенная на основании более чем 1500 импульсов JET, не превышала 0,1%. Сигналы, собранные за время экспериментальной сессии, хранятся в Системе Сбора и Контроля Данных JET (CODAS), и доступны для постэкспериментного анализа.

Измеренное поле сравнивалось с предсказаниями, основанными на моделировании. Хорошее совпадение (рисунок 7), которое наблюдалось в разнообразных экспериментальных ситуациях, подтверждает надежность и правильность измерений.

Результаты, полученные во время дейтериевой сессии C27 JET, продемонстрировали перспективность использования разработанной холловской магнитоизмерительной аппаратуры для магнитной диагностики реакторов термоядерного синтеза нового поколения. Дальнейшие тесты планируется провести в следующей D-T сессии на JET.

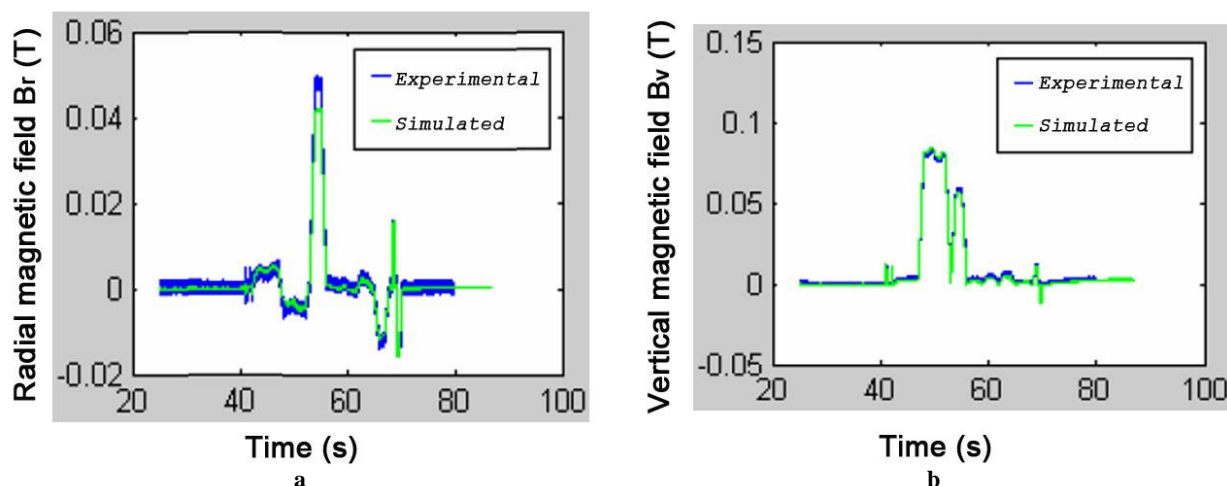


Рисунок 7. Эксперимент JET #79206. Сравнение значений радиальной (а) и вертикальной (б) составляющих вектора индукции магнитного поля, измеренных 3D зондом #52 с модельными расчетами

ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Методы и аппаратура, разработанные и испытанные для on-line тестирования материалов и средств магнитной диагностики fusion реакторов, являются перспективными для отработки задач материаловедения в экспериментальной термоядерной установке КТМ.

При этом возможность расширения круга испытываемых материалов (полупроводников, металлов и диэлектриков) позволит расширить возможности

КТМ для решения научных и практических материаловедческих задач ядерной и термоядерной энергетики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проектов УНТЦ, в том числе совместных с МНТЦ, при финансовой поддержке Госдепартамента США, Европейской Комиссии и EFDA.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krasilnikov, A.V. Status of ITER neutron diagnostics development / A.V. Krasilnikov [et al.] // Nucl. Fusion 45 (1503). – 2005.
2. Magnetic Diagnostics for ITER/BPX plasmas / Vayakis G., Walker C. // Rev. Sci. Instrum. – 2003. – Vol.74, № 4. – P.2409-2417.
3. Performance of Hall Sensor-Based Devices for Magnetic Field Diagnosis at Fusion Reactors / Bolshakova I., Duran I., Holyaka R. [et al.] // Sensor Letters. – 2007. – Vol.5. – P.283-288.
4. Methods and Instrumentation for Investigating Hall Sensors During Their Irradiation in Nuclear Research Reactors / Bolshakova I., Chekanov V., Leroy C. [et al.] // IEEE Xplore: Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Application. – 2010. – P.1-6. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5503722.
5. Development of a Magnetic Diagnostic Suitable for the ITER Radiation Environment / Ph. Moreau, J.B. Lister, G. Chitarin, S. Peruzzo, G. Vayakis, A. Le-Luyer, P. Pastor, Ph. Malard, J.M. Moret, D. Testa, M. Toussaint, Y. Fournier, R. Delogu, R. Vila, J. Romero, B. Brichard, I. Bolshakova, I. Duran, A. Envheva // IEEE Xplore: Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Application. – 2010. – P.1-8. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5503812.
6. JET-EFDA Contributors. Measuring the radiation field and radiation hard detectors at JET: Recent developments / Murari A., Edlington T., Angelone M., Bertalot L., Bolshakova I. [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2008. – Vol.593. – P.492-504.
7. Holyaka and JET EFDA Contributors. Instrumentation with Hall sensors for JET magnetic diagnostics. The results of the recent deuterium campaign at JET in 2009 / I. Bolshakova, A. Quercia, V. Coccoresse, A. Murari, I. Duran, L. Viererbl, V. Yerashok, R. // IEEE Xplore, to be published.

**БАСҚАРУ ТЕРМОЯДРОЛЫҚ СИНТЕЗДІҢ РЕАКТОРЛАРЫ ҮШІН МАТЕРИАЛДАР
МЕН ҚҰБЫРЛАРДЫҢ ON-LINE ЗЕРТТЕУІ: ӘДІСТЕРІ, АППАРАТУРАСЫ, ЖЕТІСТІГІ.
TORE SUPRA ЖӘНЕ JET ТОКАМАКТАРДЫҢ МАГНИТТІК ДИАГНОСТИКТЕРІ ҮШІН
РАДИАЦИЯЛЫҚ-БЕРІКТІ СЕНСОРЛАРДЫ ПАЙДАЛАНУ ТӘЖІРИБЕСІ**

¹⁾Большакова И., ²⁾Чеканов В., ³⁾Дюран И., ¹⁾Голяка Р., ²⁾Коноплева Р., ³⁾Коварик К., ⁴⁾Куликов С., ⁵⁾Курнаев В.,
¹⁾Макидо Е., ¹⁾Шурыгин Ф., ⁵⁾Васильевский И., ⁶⁾Виерербл Л., ¹⁾Ерашок В., ¹⁾Загачевский Ю.

¹⁾*«Львовская политехника» Ұлттық Университет, Львов, Украина*

²⁾*Петербургтік ядролық физика институты, Гатчина, Ресей*

³⁾*AS CR плазма физикасының институты, EURATOM-IPP.CR Ассоциациясы, Прага, Чехия*

⁴⁾*Ядролық зерттелердің біріккен институты, Дубна, Ресей*

⁵⁾*«МИФИ» Ұлттық зерттеу ядролық университеті, Мәскеу, Ресей*

⁶⁾*Ядролық зерттеу институты, Реж, Чехия*

Конструкция элементтері және диагностика жүйелері үшін материалдарды зерттеу жаңа буынды fusion реакторлар үшін маңызды және көкейтесті міндет болады. Қазіргі уақытта зерттеушілер әр түрлі ядролық зерттеу қондырғыларда материалдарды сынау жүргізу мәжбүр, шарттары біріншіден өз ара ерекшеленеді, ал екіншіден жаңа буынды fusion реакторлардың жағдайларына толық шарада емес сәйкес келеді.

Осы мақалада келтірілген радиациялық жағдайларды магниттік диагностиканың материалдары мен сенсорларын on-line тестілеу үшін аппаратураны әзірлеу тәжірибесі, ITER жағдайларына және кейінгі fusion реакторларға жақын, Қазақстандық КТМ токамагында материалдардың кең шеңберін тестілеу үшін пайдалануы мүмкін.

**ON-LINE INVESTIGATION OF THE MATERIALS AND INSTRUMENTS FOR
THE CONTROLLED FUSION REACTORS: TECHNIQUES, METHODS, HARDWARE, ACHIEVEMENTS.
EXPERIENCE IN APPLICATION OF RADIATION-RESISTANT SENSORS FOR MAGNETIC
DIAGNOSTICS OF TORE SUPRA AND JET TOKAMAKS**

¹⁾I. Bolshakova, ²⁾V. Chekanov, ³⁾I. Dyuran, ¹⁾R. Golyaka, ²⁾R. Konopleva, ³⁾K. Kovarik, ⁴⁾S. Kulikov, ⁵⁾V. Kurnaev, ¹⁾E.
Makido, ¹⁾F. Shurygin, ⁵⁾I. Vasilevskiy, ⁶⁾L. Viererbl, ¹⁾V. Erashok, ¹⁾Yu Zagachevskiy

¹⁾*National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine*

²⁾*Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia*

³⁾*Institute of Plasma Physics AS CR, Association EURATOM-IPP.CR, Prague, Czech Republic*

⁴⁾*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

⁵⁾*National Research Nuclear University "Moscow Engineering Physics Institute", Moscow, Russia*

⁶⁾*Institute for Nuclear Research, Rezh, Czech Republic*

Study materials for diagnostic systems and structural elements are an important and urgent task for fusion reactors of the new generation. Currently, researchers are forced to conduct testing of materials in various nuclear research facilities, the conditions in which, first, are different, and, second, not to fully comply with the terms fusion reactors of the new generation.

Experience in the development of equipment for on-line testing materials and magnetic sensors, diagnostic radiation conditions given in this article may be used to test a wide range of materials in the Kazakhstani Tokamak KTM in conditions similar to the conditions of ITER and future fusion reactors.

УДК 621.039.55

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ЖИДКИМ ЛИТИЕМ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Барсуков Н.И., Гордиенко Ю.Н., Заурбекова Ж.А., Кенжин Е.А.,
Кульсартов Т.В., Понкратов Ю.В., Тажибаева И.Л., Тулубаев Е.Ю.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе рассмотрено влияние реакторного облучения на процессы взаимодействия водорода с жидким литием. Эксперименты проводились методом газовой абсорбции с использованием специально сконструированного ампульного устройства. Приводятся результаты исследования взаимодействия водорода с жидким литием в условиях реакторного облучения, а именно: температурные зависимости константы скорости взаимодействия водорода с жидким литием при различных мощностях реактора, энергии активации процессов, и предэкспоненты в аррениусовской зависимости. Зафиксирован эффект увеличения поглощения водорода жидким литием под действием реакторного облучения. Эффект связан с ускорением диффузии водорода в жидком литии за счет локальных перегревов по объему лития, в результате ядерной реакции ${}^6\text{Li}$ с нейтроном.

ВВЕДЕНИЕ

Работы по созданию термоядерного реактора предусматривают необходимость выбора конструкционных материалов первой стенки реактора и дивертора, которые подвергаются воздействию интенсивных потоков частиц и мощных потоков тепла. В современных действующих термоядерных установках типа токамак для компонент, контактирующих с плазмой, применяются такие материалы, как углерод, вольфрам, бериллий (C, W, Be). Те же материалы предусматриваются для использования и в проекте ИТЭР. В условиях стационарных и импульсных высокоэнергичных потоков тепла и плазмы, которых предполагается достичь в ИТЭР, указанные материалы будут работать уже на пределе своих возможностей.

Соответственно, в термоядерных реакторах следующего за ИТЭР поколения, где предусматривается дальнейшее значительное повышение энергетических нагрузок на материальные поверхности реактора (например, в диверторе до уровня 20-50 МВт/м²), проблема конструкционных материалов для энергонапряженных узлов будет только возрастать. В связи с этим непрерывно происходит поиск различных альтернативных решений этой проблемы.

Проблемы деградации обращенных к плазме материалов и разрушения изделий на их основе, накопление трития и загрязнение плазмы могут быть преодолены путем использования жидких металлов с низким зарядовым числом. Наилучшим кандидатом в качестве контактирующего с плазмой материала приемных пластин дивертора и других внутрикамерных устройств является литий.

Преимущества использования жидкого лития в качестве материала, обращенного к плазме, было подтверждено множеством проведенных экспериментов с литиевыми устройствами в моделирующих условиях на плазменных ускорителях КСПУ, МК-200UG, установке «Плазменный фокус» и в условиях действующих токамаков (NSTX, FTU, T11-M, Глобус) [1-2].

Одной из проблем связанных с применением жидколитиевых систем в реакторах синтеза является определение параметров взаимодействия их плазменно-обращенной поверхности с рабочими газами, в условиях моделирующих реальную работу установок, т.е. в условиях нейтронного и гамма излучения, поэтому настоящая работа посвящена исследованиям влияния нейтронного облучения на сорбционные характеристики лития.

ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБРАЗЕЦ

В данной работе в качестве исследуемого материала рассматривался технический литий объемом 2,5 см³ и массой 0,8 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

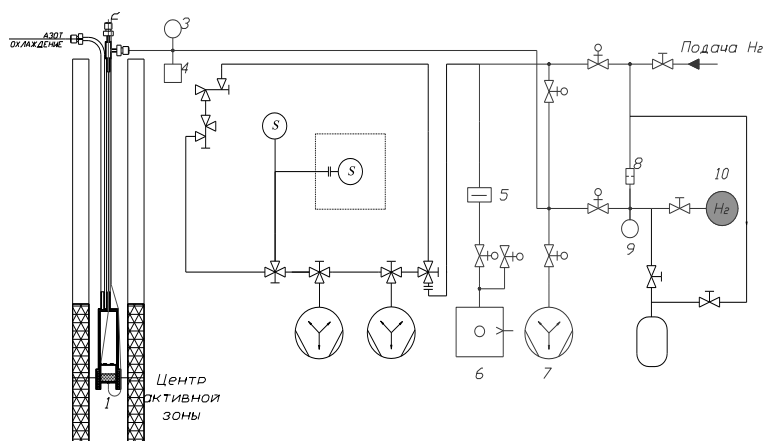
Исследования проводились на экспериментальном стенде ЛИАНА, предназначенном для изучения взаимодействия изотопов водорода с металлами, при воздействии реакторного излучения. Схема стенда приведена на рисунке 1 (описание установки приведено в работе [3]).

Исследуемый образец лития был помещен на дно ампульного устройства на уровне центра активной зоны рисунка 2. Температура лития контролировалась двумя термопарами, нагрев осуществлялся с помощью нагревателя КТМС ХК мощностью 200Вт.

Таблица 1. Элементный состав лития

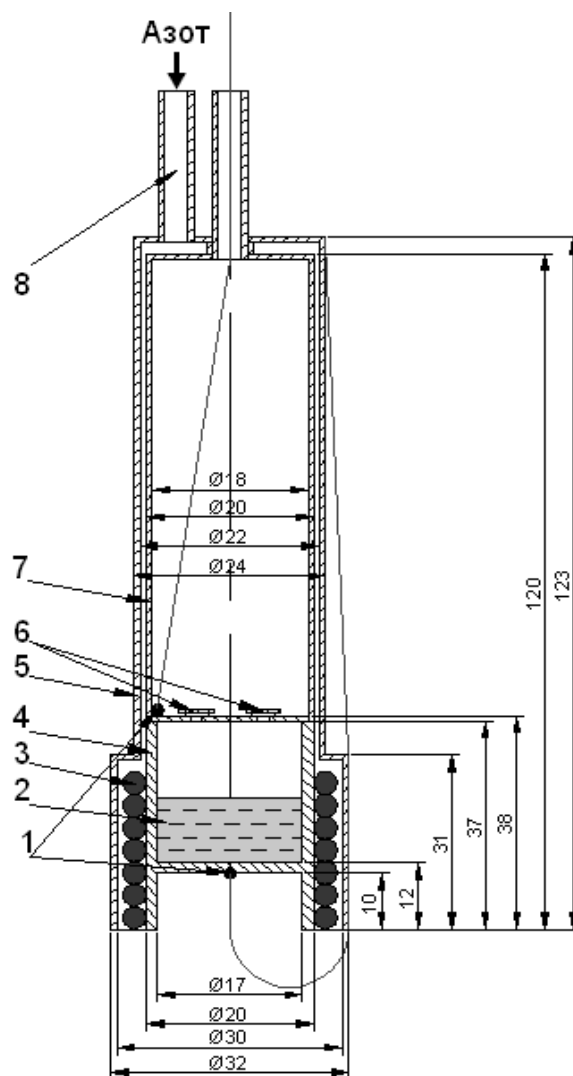
Химический элемент	Li	Na	Ca	N	Cl	Si	Fe
Содержание, %	98	1	0,15	0,1	0,02	0,005	0,005

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА
С ЖИДКИМ ЛИТИЕМ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**



1-ампульное устройство, 2-термопары, 3-датчик давления Converter, 4-датчик давления ИКД, 5-азотная ловушка, 6-форвакуумныйнасос, 7-высоковакуумный насос, 8- фильтр палладий-серебряный, 9-датчик ПМДГ, 10-емкость с водородом

Рисунок 1. Схема экспериментального стенда ЛИАНА



1 - термопары, 2 - жидкий литий (объем - 2,5 см³, масса - 0,8 г), 3 - нагреватель (в оболочке 12X18Н10Т Ø 4 мм), 4 - корпус ампулы (медь), 5 - кожух охлаждения (12X18Н10Т), 6 - отражательные экраны, 7 - корпус ампулы (12X18Н10Т), 8 - труба подачи азота

Рисунок 2. Ампула с литием

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ЖИДКИМ ЛИТИЕМ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения исследований был выбран метод газовой абсорбции. Суть метода заключалась в следующем: после того как в ампуле с жидким литием будут достигнуты все необходимые (заданные программой проведения эксперимента) условия, устанавливается стационарная температура образца. Далее в камеру напускается известное количество газа, после чего следует насыщение образца из газовой фазы при выбранной температуре. На всем протяжении эксперимента ведется непрерывная регистрация изменения давления газа в ампуле.

Условия исследований:

- исследуемый температурный интервал лежал в пределах 473...623К;
- остаточное давление в измерительном тракте $10^{-4} \dots 10^{-6}$ Па;

- входное давление водорода 80...400 Па;
- эксперименты проводились при мощности реактора 1, 3 и 6МВт.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате проведенных экспериментов были получены зависимости изменения давления водорода над жидким литием при температурах от 473 до 623 К. При данных температурах был обнаружен эффект влияния реакторного излучения на скорость взаимодействия водорода с жидким литием. Данный эффект заключался в увеличении скорости взаимодействия в условиях реакторного излучения (см. рисунок 3-4).

Результаты экспериментов показали, что увеличение скорости взаимодействия водорода с жидким литием пропорционально мощности излучения.

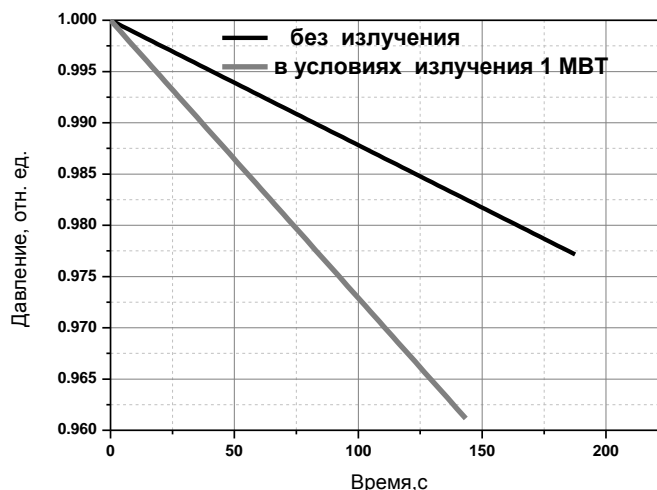


Рисунок 3. Нормированный график изменения давления водорода в экспериментальном устройстве при температуре образца 523 К. При уровне давления 120 Па

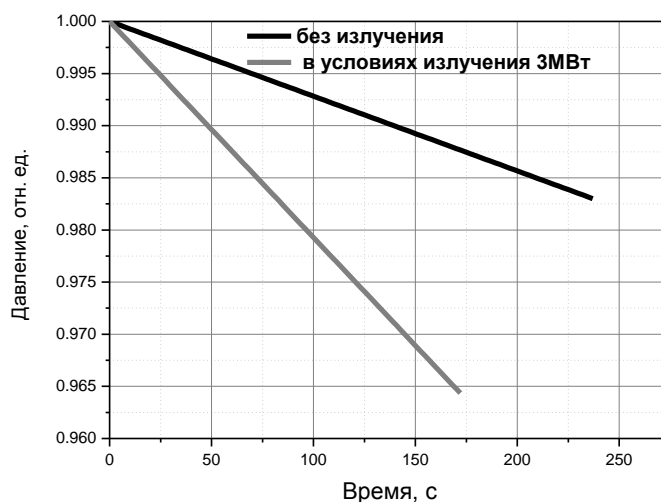


Рисунок 4. Нормированный график изменения давления водорода в экспериментальном устройстве при температуре образца 473 К. При уровне давления 130 Па

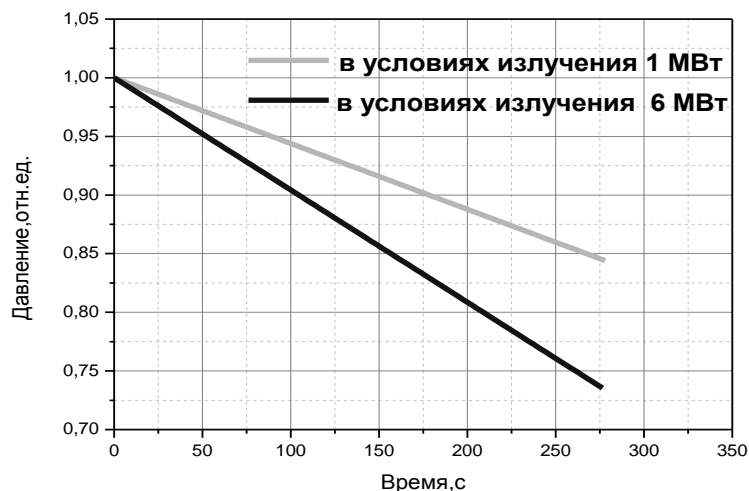


Рисунок 5. Нормированный график изменения давления водорода в экспериментальном устройстве при температуре образца 623 К условиях реакторного излучения. При уровне давления 90 Па

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА С ЖИДКИМ ЛИТИЕМ

Для объяснения полученного эффекта рассмотрим более подробно процессы, происходящие на поверхности жидкого лития при насыщении его из газовой фазы водородом (рисунок 6).

1) Адсорбция. Прежде всего, поверхность жидкого лития адсорбирует определённое количество молекул водорода. Адсорбированные поверхностью жидкого лития молекулы диссоциируют на атомы. Количество адсорбированных атомов на поверхности можно записать следующим образом: $K_{\text{прил}}\mu r S_{\text{эф}}$, моль/с, где $K_{\text{прил}}$ - коэффициент прилипания водорода, равный отношению числа адсорбированных частиц к общему числу падающих частиц на поверхность из газовой фазы, μ - газокинетический коэффициент, равный числу молекул, падающих на единицу поверхности в единицу времени при единичном давлении водорода, моль/с Па м², r - давление газа, Па, $S_{\text{эф}}$ - эффективная площадь взаимодействия, м²;

2) Десорбция. Атом водорода на поверхности может покинуть поверхность жидкого лития вследствие процесса десорбции (при ассоциации с таким

же диссоциированным атомом). Количество десорбированных атомов определяется отношением bN_0^2 , моль/с, где b - константа скорости десорбции м⁴/мольс, N_0 - концентрации адсорбированных атомов на входной поверхности жидкого лития, моль/м²;

3) Растворение. Определённое количество атомов, находящихся на поверхности, растворяется в объёме жидкого лития. Количество атомов, растворённых в объёме жидкого лития, равно χN_0 , где χ - константа скорости растворения, м³/с;

4) Выход атомов из объёма жидкого лития на поверхность. Возможен обратный процесс выхода атомов на поверхность из объёма жидкого лития. Количество вышедших на поверхность атомов будет определяться произведением ηC_0 , моль/с, где η - константа скорости выхода атомов водорода из объёма на поверхность, м³/с. C_0 - количество растворённых атомов в объёме жидкого лития, моль/м³. Тогда изменение количества атомов на поверхности (общий баланс) можем записать следующим образом:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = K_{\text{прил}}\mu r S_{\text{эф}} - bN_0^2 - \chi N_0 + \eta C_0 \quad (1)$$

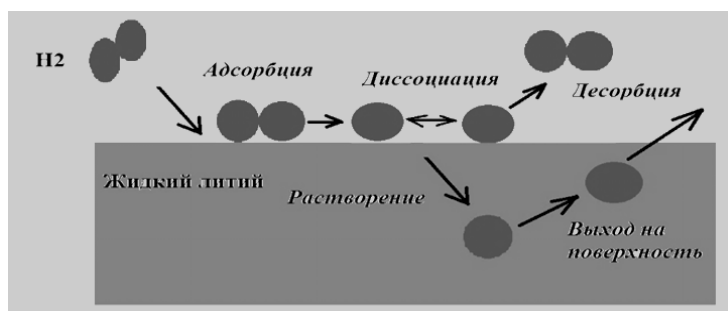


Рисунок 6. Процессы, протекающие при взаимодействии водорода с жидким литием

Теперь проанализируем процессы более подробно и применительно к нашим условиям. Для оценки скорости процесса десорбции атомов водорода, в рамках настоящей работы, был проведен следующий эксперимент: после насыщения исследуемого образца жидкого лития водородом, подача газа прекращалась, и весь оставшийся водород откачивался из экспериментальной ампулы. После этого на масс-спектрометре были сняты спектры водорода. Спектры снимались для определения количества десорбированного водорода. Как показали спектры, содержание водорода не превышало его фонового значения. Отсюда мы можем сделать вывод, что количество десорбированных молекул незначительно, и мы можем записать $bN_0 \rightarrow 0$.

Далее проанализируем процесс выхода атомов водорода из объема на поверхность. Прежде всего, заметим, что общее отношение поглощенного водорода к литию составило около 7×10^{-4} за все время экспериментов. Согласно фазовым диаграммам (рисунок 7, 8) можно сделать заключение о том, что в наших экспериментах при равномерном растворении водорода в литии мы имеем фазу (3) соответствующую обычному раствору водорода в литии. Согласно же экспериментальным оценкам: отношение концентрации адсорбированного водорода к литию на поверхности во время эксперимента по насыщению составило 5×10^{-2} . Следовательно, при таком соотношении количество вышедших на поверхность атомов не окажет значимого влияния на общий баланс, а значит $\chi N_0 \gg \eta C_0 \rightarrow 0$.

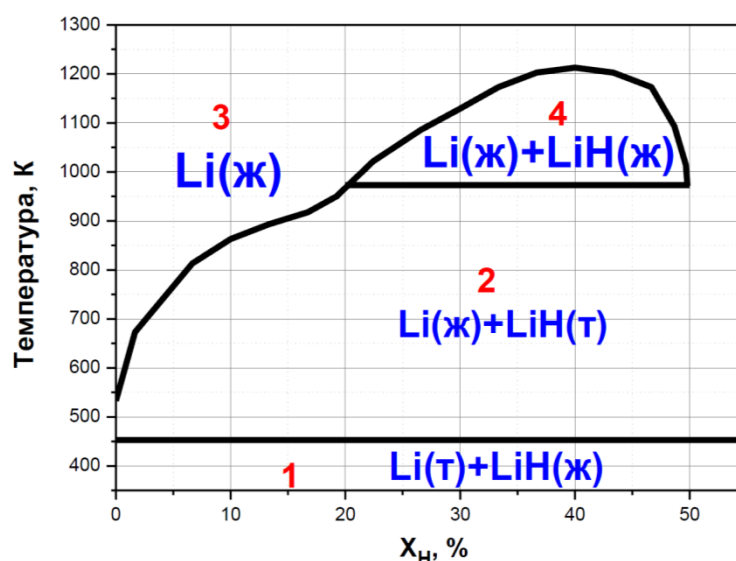


Рисунок 7. Фазовая диаграмма состояния лития

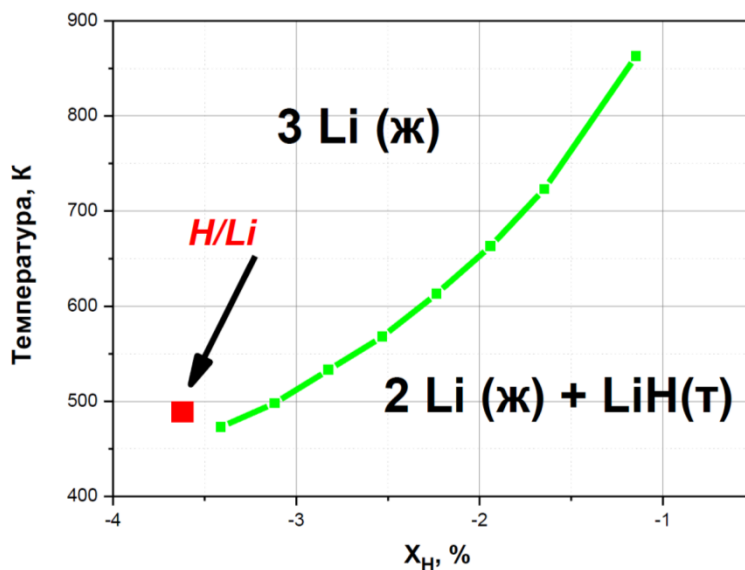


Рисунок 8. Фазовая диаграмма состояния лития при низкой концентрации водорода

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА
С ЖИДКИМ ЛИТИЕМ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

С учетом сделанных упрощений уравнение 1 принимает вид:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = K_{\text{прил}} \mu p S_{\text{эфф}} - \chi N_0 \quad (2)$$

Из уравнения 2 количество атомов на поверхности зависит от эффективной площади поверхности, от скорости растворения атомов в объеме и качества поверхности, которое характеризуется коэффициентом прилипания. В нашем случае коэффициент практически не меняется, следовательно количество атомов на поверхности зависит только от скорости растворения и эффективной площади поверхности. На основании уравнения 2 было проведено моделирование сорбции водорода жидким литием в условиях вне реакторного и реакторного излучения.

Для проведения численного расчета рассмотрим, как с течением времени происходит изменение количества атомов водорода на поверхности жидкого лития. В начальный момент времени $t = 0$, количество атомов на поверхности жидкого лития $N_H = 0$, эффективная площадь взаимодействия водорода с жидким литием равна площади лития $S_{\text{эфф}} = S_0$. Через определённый промежуток времени Δt представляемого как $t_1 = \Delta t + 0$.

Количество атомов водорода на поверхности жидкого лития на основании нашего уравнения примет вид:

$$\frac{N_H^2 - N_H^1}{\Delta t} = \rho \mu K_{\text{прил}} S_{\text{эфф}}^0$$

Следующий момент времени Δt представим как $t_2 = \Delta t + \Delta t$.

Тогда количество свободных молекул лития примет вид:

$$N_{Li}^1 = N_{Li}^0 - N_H^1$$

Эффективная площадь взаимодействия примет вид:

$$S_{\text{эфф}}^1 = S_0 \left(\frac{N_{Li}^1}{N_{Li}^0} \right)$$

Количество атомов водорода на поверхности жидкого лития, учитывая, что за это время происходит растворение водорода в жидком литии примет вид:

$$\frac{N_H^2 - N_H^1}{\Delta t} = \rho \mu K_{\text{прил}} S_{\text{эфф}}^1 - \chi N_H^1$$

Через i промежуток времени $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ количество свободных атомов водорода примет вид:

$$N_{Li}^{i-1} = N_{Li}^{i-2} - N_H^{i-1} + \chi N_H^{i-2}$$

Эффективная площадь взаимодействия составит:

$$S_{\text{эфф}}^{i-1} = S_0 \left(\frac{N_{Li}^{i-1}}{N_{Li}^{i-2}} \right)$$

Количество атомов на поверхности водорода с жидким литием примет вид:

$$\frac{N_H^i - N_H^{i-1}}{\Delta t} = \rho \mu K_{\text{прил}} S_{\text{эфф}}^{i-1} - \chi N_H^{i-1}$$

Таким образом, применяя рекуррентный расчет, определялось изменение количества атомов водорода на поверхности жидкого лития. Выполненные расчёты позволили качественно объяснить наблюдаемый эффект. Качественно весь процесс можно описать следующим образом: при взаимодействии водорода с поверхностью лития наступает баланс между количеством водорода поступающего на поверхность и растворяющегося в объеме лития. Концентрация водорода на поверхности (фактически концентрация гидрида лития на поверхности) - снижает площадь взаимодействия водорода из газовой фазы с литием. Во время реакторных экспериментов с литием, за счет ускорения диффузии увеличивается сток гидрида лития в объем образца, увеличивается эффективная поверхность взаимодействия водорода с литием. Ускорение диффузии мы связываем с реакцией нейтрона с ${}^6\text{Li}$ - благодаря высокому сечению взаимодействия и большому выделению энергии в реакции, что приводит к термопикам по объему жидкого лития - и способствует конвективным перемешиваниям. На основе предложенной модели были рассчитаны температурные зависимости константы взаимодействия водорода с жидким литием (рисунок 9).

По данным температурным зависимостям были определены основные параметры взаимодействия, такие как энергии активации процессов, и предэкспоненты в аррениусовской зависимости.

Таблица 2. Рассчитанные параметры взаимодействия водорода с жидким литием

Стадия эксперимента	K_0 , моль/(м ² ·с·Па)	E , кДж/моль	Примечание
1	(5,0±0,2)E-05	22,8±0,4	Без облучения
2	(4,0±0,7) E-05	21,6±0,7	Реакторные эксперименты (1МВт)
3	(3,5±1,0) E-05	21,7±0,5	Реакторные эксперименты (1МВт)
4	(4,5±1,5) E-05	20,6±0,7	Реакторные эксперименты (3 МВт)

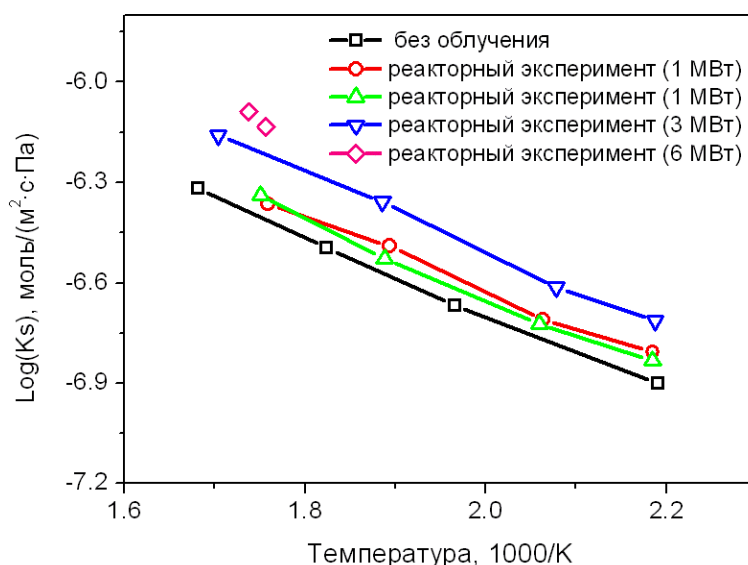


Рисунок 9. Температурные зависимости константы взаимодействия изотопов водорода с жидким литием

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований был зафиксирован эффект увеличения поглощения изотопов водорода с жидким литием под действием реакторного облучения.

Впервые были получены температурные зависимости константы скорости взаимодействия изотопов водорода с литиевой КПС, при различных мощностях реактора. По полученным зависимостям были определены основные параметры взаимодействия, такие как энергии активации процессов, и предэкспоненты в аррениусовской зависимости, константы скорости взаимодействия изотопов водорода с жидким литием.

Эффект влияния реакторного излучения связан с увеличением константы скорости растворения. Увеличение константы растворения вызвано ускорением диффузии водорода в литии.

Было проведено моделирование сорбции водорода жидким литием в условиях реакторного излучения. На основе моделирования удалось показать, что наблюдаемый эффект влияния реакторного излучения на увеличение скорости взаимодействия изотопов водорода с жидким литием связан с увеличением константы скорости растворения водорода в жидком литии, в результате чего увеличивается эффективная площадь взаимодействия. Увеличение константы растворения вызвано ускорением диффузии. В свою очередь, увеличение диффузии водорода связано с реакцией нейтрона с ${}^6\text{Li}$ - благодаря большому выделению энергии в реакции



Выделение значительной энергии приводит к локальным перегревам по объему жидкого лития и способствует его конвективному перемешиванию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Apicella, M.L., Mazzitelli, G., Lazarev, V.B., Azizov, E.A., Mirnov, S.V., Petrov, V.G., Evtikhin, V.A., Lyublinski, I.E., Vertkov, A.V. et al. Preliminary analysis on a liquid lithium limiter in capillary porous system (CPS) configuration in view of a "lithization" experiment on FTU tokamak. — Fusion Eng. and Design, 2005, vol. 75 – 79 p. 351 – 355.
2. I.Tazhibayeva, I.Lublinski, A.Vertkov, V.Lazarev, A.Azizov, G. Mazzitelli, P. Agostini, "Mock-up divertor of KTM tokamak on the base of lithium CPS", abstract for 19 ANS Technical Meeting on technology of fusion energy, TOFE-19, Las Vegas, 8-11 November, 2010, CA, USA, p.93.
3. Federici, G. Plasma-material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors / G. Federici [et al.] // Nucl. Fusion. – 2001. – № 41. – P. 1967–2137.

**РЕАКТОР СӘУЛЕЛЕНДІРУЫ ШАРТТАРЫНДАҒЫ СУТЕГІНІҢ ИЗОТОПТАРЫНЫҢ
СҰЙЫҚ ЛИТИЙМЕН ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ АНЫҚТАУЫ**

**Барсуков Н.И., Гордиенко Ю.Н., Заурбекова Ж.А., Кенжин Е.А.,
Кульсартов Т.В., Понкратов Ю.В., Тажибаява И.Л., Тулубаев Е.Ю.**

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Жұмыста сұйық литиймен сутегінің өзара әрекет ету үрдісіне реакторлық сәулелендірудің әсері қарастырылды. Тәжірибелер арнайы құрастырылған ампула құрылғысын пайдаланумен газды абсорбция әдістерімен жүргізілді. Реакторлық сәулелену жағдайында сутегінің сұйық литиймен өзара әрекет етуін зерттеу нәтижесі келтірілген, нақтырақ айтқанда: реактордың әртүрлі қуаты кезінде сутегінің сұйық литиймен өзара әрекет ету жылдамдығын константаның температуралық тәуелділігі, үрдістердің активтену энергиясы, Аррениусовтік тәуелділіктің экспоненті. Реакторлық сәулелену әсерімен сутегін сұйық литиймен сорып алудың жоғарылау әсері анықталды. ${}^6\text{Li}$ нейронмен ядролық реакциясы нәтижесінде, литий көлемі бойынша локалды байланыс есебінен сутегінің сұйық литиймен диффузиясын жылдамдатумен байланысты әсер.

**DETERMINATION OF THE INTERACTION PARAMETERS
OF HYDROGEN ISOTOPES WITH LIQUID LITHIUM UNDER REACTOR IRRADIATION**

**N.I. Barsukov, Yu.N. Gordienko, Zh.A. Zaurbekova, Ye.A. Kenzhin,
T.V. Kulsartov, Yu.V. Ponkratov, I.L. Tazhibayeva, Ye.Yu. Tulubayev**

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

In this paper the influence of reactor irradiation on the process of hydrogen interaction with liquid lithium is considered. The experiments were performed by gas absorption method using a specially designed ampoule device. Results of study of the hydrogen interaction with liquid lithium under reactor irradiation, namely the temperature dependence of the rate constant of the hydrogen interaction with liquid lithium for different powers of the reactor, the activation energy of processes, and pre-exponential factor in the Arrhenius dependence. The effect of increase of hydrogen absorption by liquid lithium under the reactor irradiation influence is fixed. The observed effect is due to the acceleration of the hydrogen diffusion in liquid lithium by hot spots in lithium volume in a nuclear reaction of ${}^6\text{Li}$ with neutron.

УДК 621.039

ВОЗМОЖНОСТИ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ С ВОДНЫМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕМ**Котов В.М., Витюк Г.А., Сураев А.С.***Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Работа посвящена поиску технических решений, обеспечивающих повышение технических и экономических характеристик атомных электростанций. Рассматривается возможность использования энергии замедления нейтронов в канальных водяных реакторах с газовым теплоносителем и применение в цикле Ренкина тройного перегрева пара.

Показаны высокий достигаемый уровень преобразования энергии в механическую, возможность применения хорошо отработанных, широко используемых стержневых ТВЭЛов, простота конструкции ТВС. Совокупность характеристик предлагаемого реактора показывает его преимущества перед такими разработками как ВТГР и реакторы, охлаждаемые водой со сверхкритическими параметрами.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе развития атомной энергетики в качестве перспективных вариантов рассматривались различные типы реакторов. Среди них были реакторы с органическим теплоносителем [1], с теплоносителем на основе диссоциирующей N_2O_4 [2], тяжеловодные и графитовые реакторы с газовыми теплоносителями [3]. Представленные в [1-3] типы реакторов развития не получили по различным причинам.

В настоящее время реакторы с газовым теплоносителем рассматриваются в варианте с циклом Брайтона и графитовым замедлителем (ВТГР). Несмотря на достаточно большой срок разработки таких реакторов и представление их в качестве лидеров завтрашней атомной энергетики эффект от их внедрения не наблюдается.

В работе [4] показано, что в тяжеловодных реакторах с газовым теплоносителем достигим термодинамический КПД на уровне 45.6 % при нагреве теплоносителя до 500 °С, что возможно с использованием хорошо отработанных стержневых ТВЭЛов. Эффект достигается за счет полного использования энергии деления ядер, в том числе энергии замедления нейтронов, высокого давления пара в цикле Ренкина и тройного перегрева пара. Положительным качеством данного цикла является высокая сухость отработанного пара (на уровне 0.93 против 0.7 в турбинах легководных реакторов), что снижает затраты на изготовление лопаток турбины [5].

Преимущества тяжеловодных реакторов в полной мере могут быть использованы, как и быстрых реакторов, при включении замкнутого топливного цикла с переработкой отработавшего топлива. В противном случае, их достоинства приближаются по величине к недостаткам – дороговизне тяжелой воды, осложнении в эксплуатации систем циркуляции тяжелой воды, большими габаритами активной зоны. Технология переработки отработавшего топлива внедряется малыми темпами. Имеются факторы как технического, так и экономического характера для такого сдерживания [6].

Целью настоящей работы показать возможности газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем, в том числе и с простой водой в качестве замедлителя, построенного на основе части технических решений [4].

1. КОНСТРУКЦИЯ ЛЕГКОВОДНОГО РЕАКТОРА С ГАЗОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Рассмотрен реактор с тепловой мощностью 1000 МВт. Поскольку в реакторе используются разнородные теплоноситель и замедлитель, реактор выполняется канального типа. Большая замедляющая способность легкой воды в сравнении с тяжелой делает шаг решетки размещения каналов небольшим. Если в тяжеловодном реакторе он превышает 25 см, то в рассматриваемом реакторе с простой водой установлен шаг треугольной решетки ~12 см. В активной зоне установлено 549 ТВС с внешним диаметром корпуса 10.0 см. Диаметр активной зоны составляет 3.0 метра, высота топлива в ТВС – 2.2 метра.

В каждой ТВС установлено 59 ТВЭЛов с внешним диаметром 6.8 мм.

Давление замедлителя установлено равным 2.5 МПа, давление теплоносителя на входе в ТВС – 6.0 МПа. В качестве теплоносителя используется водород.

Температура замедлителя на входе в активную зону равна 200 °С, на выходе 210 °С, недогрев до кипения на выходе из активной зоны составляет 14 °С.

Схема реактора представлена на рисунке 1. Подача теплоносителя в каналы с ТВС осуществляется снизу вверх с помощью интегральных коллекторов [7]. Над верхним интегральным коллектором размещается цилиндрическая камера с диаметром равным диаметру активной зоны и высотой равной высоте ТВС, обеспечивающая возможность перестановки ТВС.

Система регулирующих стержней в представленном варианте размещается снизу активной зоны. Аналогом такого решения является система регулирования кипящего реактора ABWR [8]. Возможна обратная компоновка, когда камера перестановки ТВС размещается под активной зоной, а система ре-

гулирования над него. В таком варианте потребуется большая высота подреакторных помещений.

2. ПУТИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ В ЦИКЛ РЕНКИНА

Потенциал предлагаемого в настоящей работе технического решения во многом обусловлен схемой передачи тепловой энергии от реактора в цикл Ренкина. В известных АЭС с газовым теплоносителем и тяжеловодным замедлителем [3] энергия в паровой контур передается только от газового теплоносителя. При этом теряется полностью энергия замедления нейтронов и энергия утечек тепла из каналов в замедлитель. Суммарные потери могут превышать 10 % от полной энергии, связанной с делением ядер.

Кроме того, высокие требования к минимизации утечек тепла усложняют конструкцию ТВС. В предлагаемом решении энергия замедления и утечек тепла из ТВС передается воде, образованной из отработанного пара турбины (рисунок 2).

Максимальное давление пара в контуре равно 20.0 МПа, максимальная температура перегрева пара в обоих нагревателях – 500 °С.

Все теплообменники в данной схеме выполнены с противотоком отдающих и принимающих энергию рабочих тел. Схема дополнена емкостью, обеспечивающей защиту ТВС от протечек пара высокого давления в контур газового теплоносителя реактора. При возникновении течи пара высокого давления в

контур теплоносителя пар будет расширяться, его давление падать как за счет увеличения объема в дополнительной емкости, так и за счет снижения давления в контуре пара.

В контуре вода-пар установлено два насоса. Первый повышает давление воды до давления равного давлению замедлителя в реакторе, второй - до максимального давления в цикле Ренкина. Это решение упрощает требования к теплообменнику, передающему тепло от замедлителя.

Для обеспечения передачи энергии от замедлителя в цикл Ренкина поднимается давление в замедлителе и его температура. При указанных выше температурах пара и его давлении баланс энергии в цикле Ренкина с тремя перегревами имеет следующий вид:

- нагрев воды от 31 °С до 365.7 °С
41.27 %;
- превращение воды в пар (365.8 °С)
14.32 %;
- первый перегрев пара (365.8 – 500 °С)
20.11 %;
- второй перегрев пара (300.0 – 500 °С)
12.64 %;
- третий перегрев пара (278.3 – 500 °С)
11.66 %.

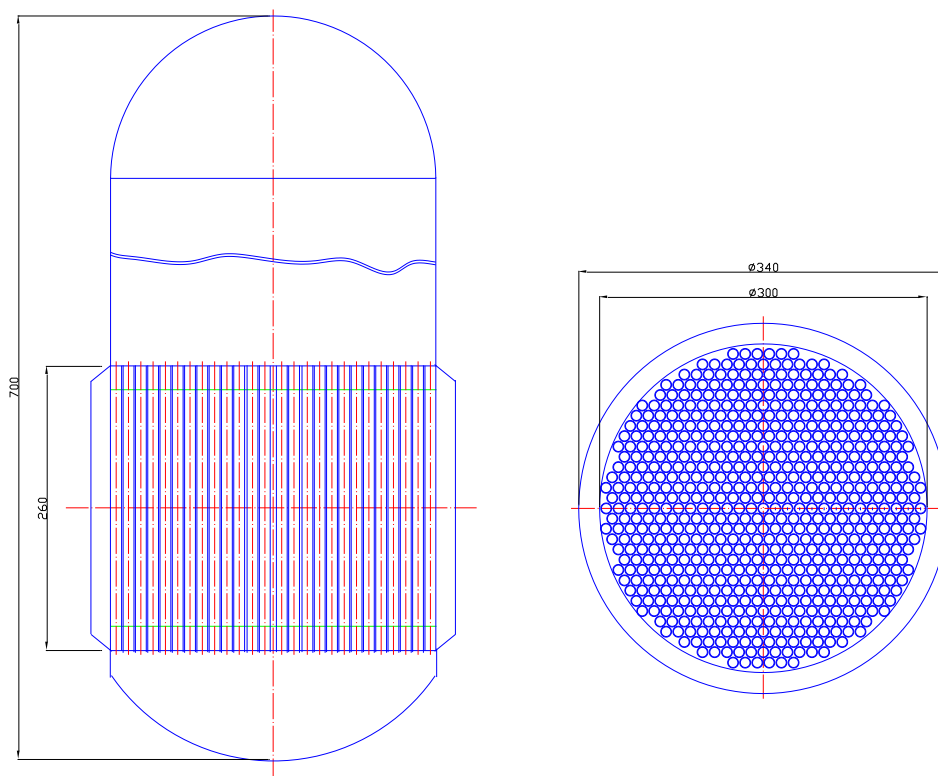


Рисунок 1. Схема газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем

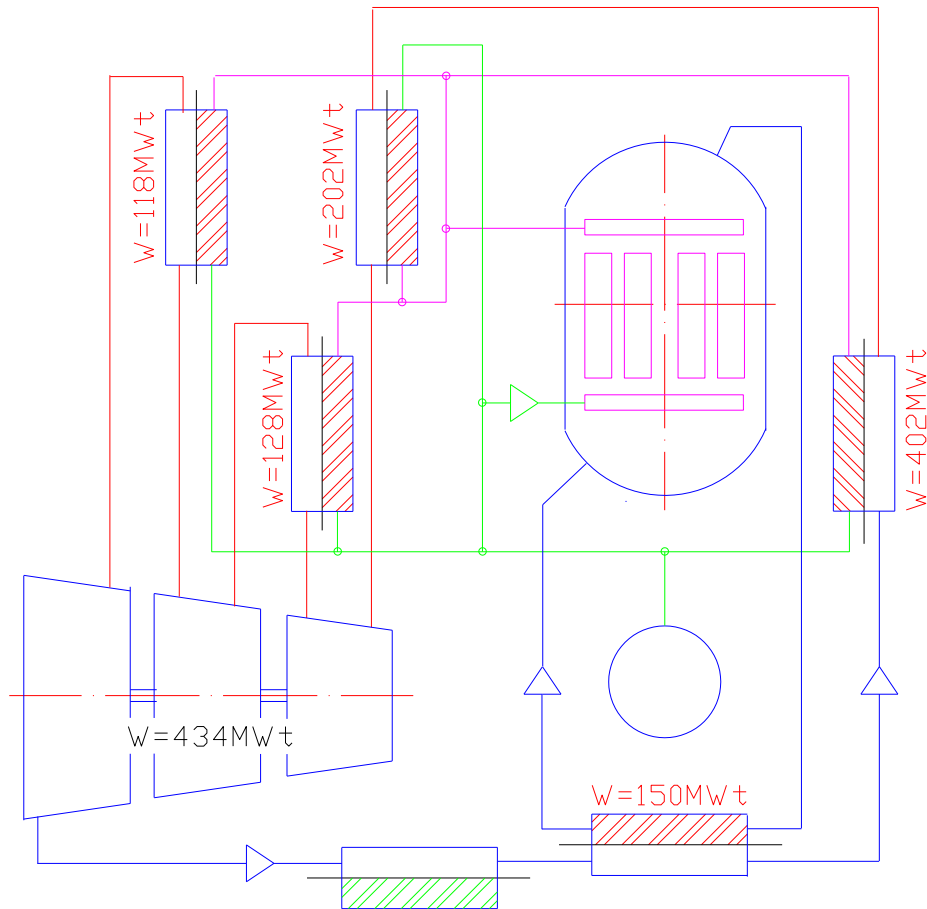


Рисунок 2. Схема передачи тепловой энергии от реактора в цикл Ренкина. Тепловая мощность реактора 1000 МВт

При давлении, развиваемом первым водным насосом, максимальная температура воды может составить 275°C , и максимальное количество тепловой энергии, переносимой замедлителем, в этом случае, будет равно $\sim 30,0\%$ от всей энергии, выделяемой в реакторе. Если энергия замедления нейтронов равна 7% от общей энергии, то на утечку из ТВС и интегральных коллекторов в замедлитель можно допустить до 23% энергии, выделяемой в ТВС. Это может упростить конструкцию ТВС и интегральных коллекторов. Кроме того, утечка тепла из самой ТВС снижает потребный расход теплоносителя, затраты на его прокачку.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛА РЕНКИНА

Была исследована зависимость коэффициента полезного действия от числа контуров перегрева и давления пара в цикле. В расчетах характеристик цикла использовалась программа [9]. Представляет интерес зависимости доли энергии, затрачиваемой на подогрев воды от момента её конденсации до

точки парообразования, и доли энергии, затрачиваемой на парообразование от максимального давления пара в цикле. Эти зависимости и зависимость их суммы представлены на рисунке 3. Важным для рассматриваемого технического решения является повышение доли энергии затрачиваемой на подогрев воды с ростом максимального давления. Тем самым, с ростом давления увеличивается возможность переноса энергии в цикл с замедлителем. Хотя и при минимальном давлении пара она достаточно велика.

Доля энергии на парообразование уменьшается, также уменьшается и суммарная доля энергии на нагрев воды и её парообразование. При превращении тепловой энергии цикла в механическую важную роль играет сумма энергий нагрева и парообразования, как "неактивная" часть цикла. В соответствии с этими данными, наблюдается рост термодинамического КПД цикла при повышении давления пара в цикле (рисунки 3 и 4).

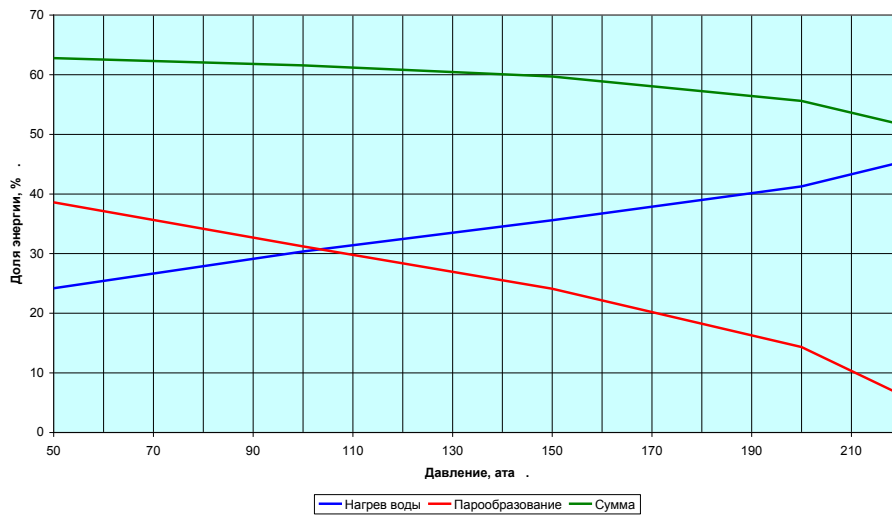


Рисунок 3. Зависимости долей энергии затрачиваемых на нагрев воды, её парообразование и суммы этих долей от максимального давления цикла

Были определены зависимости КПД и сухости пара на выходе из турбины от максимальной температуры цикла для случая, когда давление на входе ступеней турбины равны 200, 55 и 12.5 ата. Эти зависимости представлены на рисунке 5. При иных соотношениях давлений КПД и сухость пара меняются незначительно.

Даже при минимальной температуре (400 °С) полный КПД существенно превышает соответ-

ствующий КПД наиболее распространенных сейчас водо-водяных реакторов. При максимальной температуре, которая может быть достигнута в ходе оптимизации ТВС и её твэлов, КПД становится близким КПД высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, работающих в цикле Брайтона, имеющих сложную конструкцию твэлов и суммарную мощность турбины и компрессора в четверо превосходящую мощность турбины цикла Ренкина.

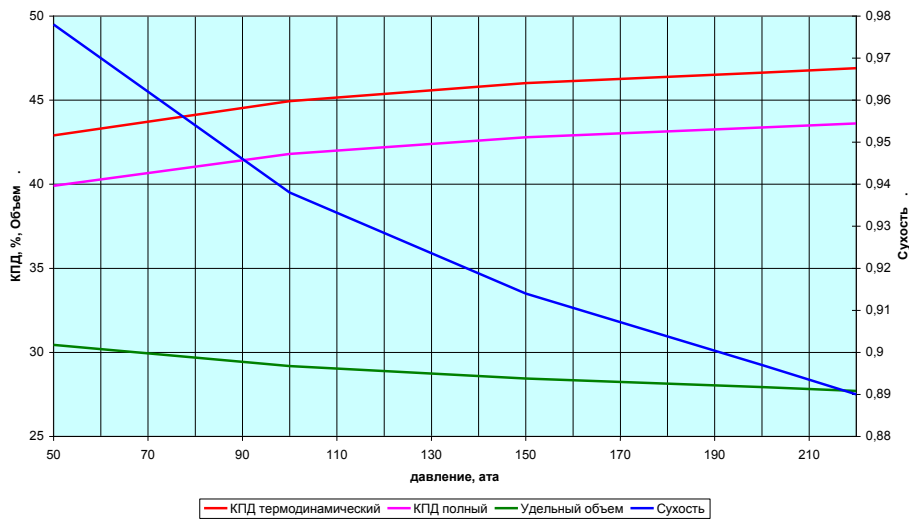


Рисунок 4. Зависимости термодинамического и полного КПД, удельного объема и сухости пара в конце расширения от максимального давления пара в цикле

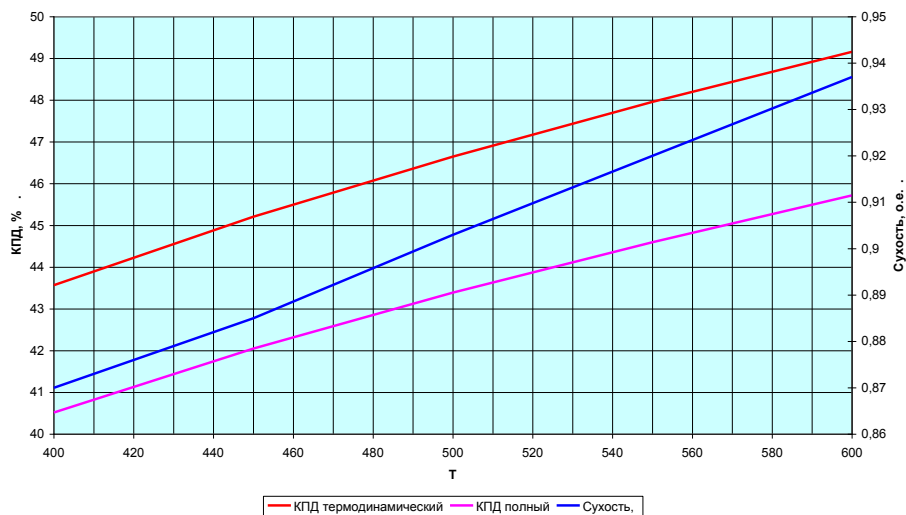


Рисунок 5. Зависимости термодинамического и полного КПД и сухости выходного пара из турбины от максимальной температуры цикла при максимальном давлении 20,0 МПа

4. РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАРИАНТОВ ТВС

Проведены расчеты теплофизических характеристик двух вариантов ТВС с использованием программы [10]. Первый из них выполнен по традиционной схеме ТВС канальных реакторов с теплоизоляцией газового тракта теплоносителя, содержащей экран и газовый зазор между трактом теплоносителя и корпусом ТВС. Второй вариант выполнен по упрощенной схеме и не содержит экрана. В нем поток теплоносителя непосредственно соприкасается с корпусом ТВС. В каждом из вариантов ТВС рассмотрена возможность использования твэлов с топливом в виде двуокиси урана и топливом из металлического урана.

Варианты ТВС и окружающего их слоя замедлителя представлены на рисунке 6. Исходные данные и результаты расчетов представлены в таблице 1. Данные по характеристикам замедлителя не учитывают энерговыделение за счет замедления нейтронов. Величина этого энерговыделения близка к величине перетечки тепла из канала упрощенной схемы. Реальная скорость потока замедлителя в обоих случаях вырастет. Величина перетечек тепла из ТВС останется той, которая приведена в таблице 1.

Температура теплоносителя на выходе ТВС 500 °С достигается без превышения допустимых температур материалов сердечников твэлов и их оболочек во всех вариантах.

Упрощенный вариант ТВС передает до 6 % мощности ТВС в замедлитель, что меньше допустимого значения, разрешенного предлагаемой технологией передач энергии в цикл Ренкина (глава 2). При этом обеспечивается экономия энергии на прокачку теплоносителя в реакторе на уровне ~1,7 МВт.

Определена мощность ТВС без теплоизоляции, которая может быть передана в замедлитель без прокачки теплоносителя и достижения максимума температуры одного из элементов ТВС. Она составила ~10 кВт, что соответствует энерговыделению продуктов деления спустя сутки после останова реактора.

5. РАСЧЕТ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА

Проведены расчеты нейтронно-физических характеристик реактора [11], отличающегося содержанием делящегося вещества в начальном топливе и концентрацией тяжелой воды в смеси тяжелой и обычной вод. Шаг решетки ТВС в варианте с простой водой принят равным 12 см (треугольная решетка). В расчетах использовались ТВС с теплоизоляционным чехлом и без него.

В отражателе использовалась та же смесь вод, что и в замедлителе. Толщина слоя отражателя изменялась от 15 до 50 см в зависимости от содержания тяжелой воды.

Необходимость использования тяжелой воды диктуется тем обстоятельством, что при достаточном количестве простой воды в качестве замедлителя получается малый шаг решетки, который ухудшает возможность создания и обслуживания системы перегрузки ТВС. Положительным фактором при использовании тяжелой воды в смеси вод является снижение потерь нейтронов в протии. Требуемое количество тяжелой воды является небольшим по массе, и, кроме того, стоимость воды с малым содержанием в ней тяжелой воды гораздо меньше, чем стоимость тяжелой воды большого обогащения.

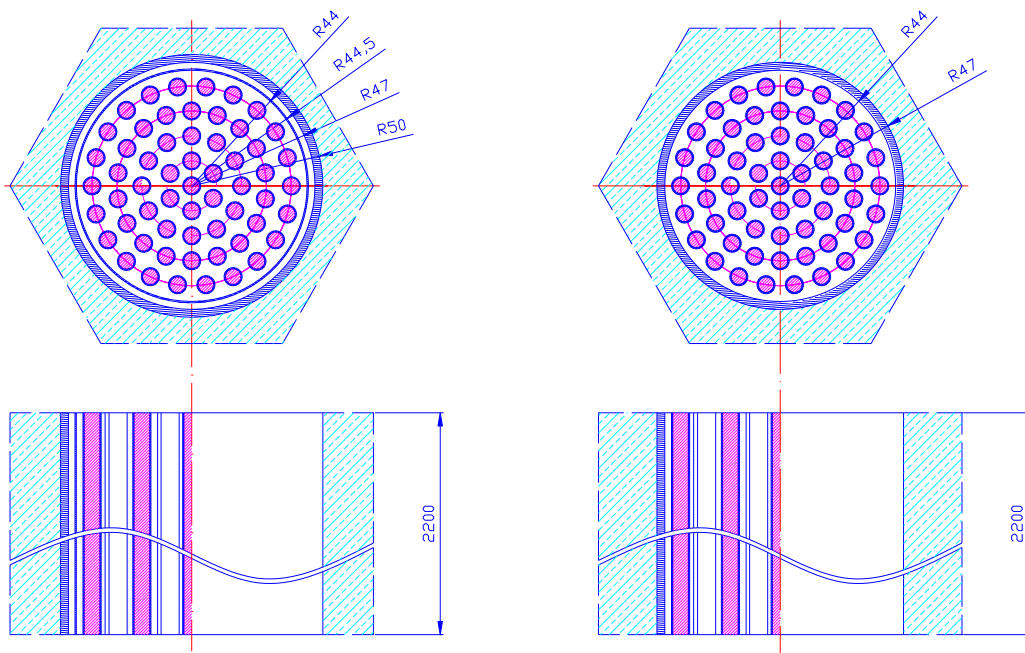


Рисунок 6. Варианты конструкции ТВС реактора.

Таблица 1. Теплогидравлические характеристики каналов

Параметр	Значение			
	1 вариант		2 вариант	
Тип топлива	UO ₂	U _{мет}	UO ₂	U _{мет}
Мощность ТВС, кВт	1821.5			
Теплоноситель	водород			
Температура теплоносителя на входе в ТВС, К	633			
Температура теплоносителя на выходе из ТВС, К	773			
Расход теплоносителя в реакторе, кг/с	473.9		362.34	
Расход замедлителя в реакторе, кг/с	1932.48		6807.6	
Перепад давления теплоносителя по высоте ТВС, Па	50300		30840	
Перепад давления замедлителя по высоте реактора, Па	370		1480	
Средняя скорость теплоносителя на входе, м/с	98.2		75	
Средняя скорость теплоносителя на выходе, м/с	121.8		92.3	
Средняя скорость замедлителя на входе, м/с	0.88		2.29	
Средняя скорость замедлителя на выходе, м/с	0.89		2.32	
Максимальная температура твэла, К	1512	1197	1602	1294
Максимальная температура гелиевого зазора, К	1058	1054	1157	1151
Максимальная температура оболочки твэла, К	957	954	1062	1056
Общий тепловой поток через стенку ТВС, кВт	3.79	3.794	108.8	109.6
Мощность на прокачку теплоносителя в реакторе, МВт	≈8.57		≈6.88	
Мощность на прокачку замедлителя в реакторе, кВт	≈0.8		≈11.8	

Для примера в реакторе CANDU близкой мощности требуется свыше 200 тонн тяжелой воды, в предлагаемом реакторе около 50 тонн смеси вод при содержании тяжелой около 70 %. Стоимость необходимой водной смеси составляет менее 20 % от стоимости дополнительной годовой выработки электроэнергии за счет повышения КПД от 32 % до 45 %.

Расчет характеристик кампании

На рисунке 7 приведено изменение содержания делящихся веществ в кампании реактора с замедлителем в виде простой воды с начальным содержанием ²³⁵U 2.5 % в топливе в виде UO₂.

Расчет проведен для работы реактора с многократной перестановкой топлива и замещением час-

тей топлива с максимальным выгоранием на свежее топливо [12]. Выгорание в топливе для этого реактора достигает 22,06 МВт*сут/кг. При однократной работе топлива в активной зоне длительность кампании сокращается до 140 суток (выгорание до 5,6 МВт*сут/кг).

Проведен расчет характеристик вариантов реактора, отличающихся видом замедлителя, топлива, шагом решетки и типом ТВС. Плотность топлива из металлического урана принята равной 8.8 г/см³, что обеспечивает равную загрузку реакторов обоих типов.

Лучшие характеристики кампании, из числа представленных в таблице 2, достигаются при уста-

новке в реактор ТВС без теплоизоляции с водой, в которой содержится 95 % тяжелой воды при шаге решетки 16 см.

В этом варианте доля использования природного урана достигает значения, характерного для реакто-

ров CANDU, лучших из тепловых реакторов в этом отношении. Однако, в реакторах CANDU достигаемое выгорание примерно в четыре раза ниже, а количество тяжелой воды и её состав требуют много больших затрат.

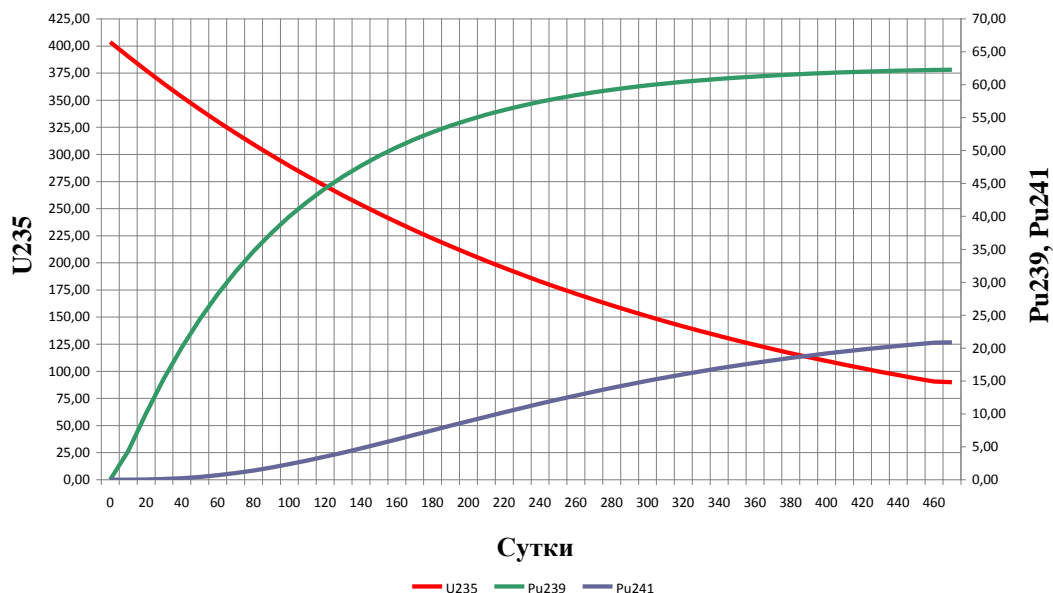


Рисунок 7. Изменение содержания делящихся веществ в кампании реактора с начальным содержанием ^{235}U 2.5 % и топливом в виде UO_2

Таблица 1. Характеристики кампаний вариантов газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем

Параметр	Значение			
	UO_2		U metal	UO_2
Тип топлива				
Доля D в замедлителе, %	0		70	95
Шаг размещения ТВС, см		12.0		16
Тип ТВС		С теплоизоляцией (ТИ)		Без ТИ
Масса ^{235}U в начале кампании, кг		403		
$K_{эфф}$, о.е.	1.23	1.196	1.205	1.353
Утечка, %	0.6	4.2	4.2	2.55
Поглощение в протии, %	20.85	8.99	8.92	5.86
Поглощение в ^{235}U , %	9.18	9.91	10.09	10.6
Деление на ^{235}U , %	48.0	46.19	46.15	53.9
Поглощение в ^{238}U , %	18.2	28.5	28.1	24.6
Деление на ^{238}U , %	2.13	2.5	2.86	1.44
Длительность кампании, суток	479	462	483	972
Выгорание топлива, МВт*сут/кг	22.06	25.37	25.74	39.6
Остаток ^{235}U , кг	91	89.9	83.1	16.5
Наработка ^{239}Pu , кг	39.3	62.3	57.8	61.3
Наработка ^{241}Pu , кг	11.5	20.9	19.9	20.1
Доля использования урана, %	0,59	0.682	0.692	1.065

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенная схема реактора и включения его элементов в цикл Ренкина обеспечивает получение термодинамического КПД на уровне свыше 46 % при температуре нагрева газа 500 °С, максимальном давлении пара 20.0 МПа, использовании хорошо отработанных стержневых твэлов.

Турбина парового контура может быть построена с минимальным применением легированных материалов её лопаток, т.к. на выходе турбины достигается высокая сухость пара.

ТВС предлагаемого реактора может быть построена по упрощенной схеме без теплового экрана, что снижает затраты на её создание, затраты на прокачку теплоносителя, потери нейтронов, габариты активной зоны.

Конструкция упрощенной ТВС обеспечивает возможность передачи энерговыделения продуктов деления в ходе расхолаживания в контур замедлителя без использования газового контура теплоносителя через двое суток после останова реактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полушкин, К.К. Атомная электростанция "Арбус" с органическим теплоносителем и замедлителем / И.Я.Емельянов, П.А.Деленс [и др.] // Атомная энергия, – 1964. – Т. 17, вып. 6. – С. 439 – 448.
2. Красин, А.К. Физико-технические основы создания АЭС с быстрыми газоохлаждаемыми реакторами и с диссоциирующим теплоносителем – четырехокисью азота / А.К. Красин [и др.] // Атомная энергия, – 1972. – Т. 32, вып. 3.
3. Gas-cooled power reactors. Directory of Nuclear Reactors. International Atomic Energy Agency//Vienna. – 1968. – Vol. 7, – P. 243 – 302.
4. Kotov, V. M. Termal Reactors with High Reproduction of Fission Materials / V. M. Kotov / Nuclear Power – Practical Aspects. Edited by Wael Ahmed. – P.179 – 218. <http://dx.doi.org/10.5772/2580>
5. Udo Zirn. Hitachi turbine generator technology for nuclear applications / Udo Zirn, Motonari Haraguchi / www.hitachipowersystems.us.
6. Решетников, Ф.Г. Проблемы развития ядерной энергетики / Ф. Г. Решетников // Атомная энергия, – 2010. – Т. 10, вып. 6, – С. 353 – 354.
7. Канальный ядерный реактор с интегральными коллекторами: инновационный патент Республики Казахстан. Котов, В. М. Котов С. В. – заявка № 21276; 25.03.2009.
8. Advanced Boiling Water Reactor (ABWR). Plant General Description // General Electric Nuclear Energy. –1999. – P. 149.
9. Иванов М.Ю. Теплофизические свойства воды и водяного пара. Программный код Parvo 95. Версия 3.3. 2004 г. // <http://fortraner.narod.ru/index.htm>
10. Fluent version 6.3.26 User Reference; Fluent, Inc.; 2006.
11. MCNP/5: General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, 2003.
12. Котов, В.М. Расчет характеристик кампании энергетических реакторов / В. М. Котов, Р. А. Иркимбеков // Вестник НЯЦ РК – 2011. – вып. 3. – С. 14-17.

**СУ БАЯУЛАТҚЫШЫНДАҒЫ ГАЗБЕН
САЛҚЫНДАТЫЛАТЫН РЕАКТОРЛАРДЫҢ МҮМКІНДІКТЕРІ**

Котов В.М., Витюк Г.А., Сураев А.С.

ҚР ҰАО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Жұмыс атом электр станцияларының техникалық және экономикалық сипаттарын арттыруды қамтамасыз ететін техникалық шешімдерді іздеуге арналаған. Нейтрондарды бәсеңдететін энергиясын газды жылу тасымалдағышты каналды сулы реакторларда пайдалану және буды үш қайтара қыздыру Ренкин циклінде қолдану мүмкіндігі қарастырылады.

Энергияның механикалық түрленуінің жеткен жоғары деңгейі, жақсы жетілдірілген, кең пайдаланылатын стерженьді твэлдерді қолдану мүмкіндігі, ЖБҚ құрылғысының қарапайымдылығы көрсетілген. Ұсынылған реактордың сипаттарының жиынтығы ВТТР және аса қауіпті параметрлі сумен салқындатылатын реакторлар сияқты жетілдірулердің алдында өзінің артықшылығын көрсетеді.

GAS-COOLED LIGHT-WATER-MODERATED REACTOR CAPASITY

V.M. Kotov, G.A. Vityuk, A.S. Suraev

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper is devoted to technical decision making that enhance the technical and economic characteristics of nuclear power plants. The possibility of using the energy of neutron moderation in gas-cooled channel water reactors and use in Rankine cycle of triple steam superheating is considered.

The high achieved level of energy conversion to mechanical one, possible application of well-established and widely used fuel rods as well as simple design of fuel assembly are shown. A set of characteristics of the proposed reactor shows its advantages over such designs as HTGR and water-cooled reactors with supercritical parameters.

УДК 539.12

ДИНАМИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ В КВАРК-ГЛЮОННОМ КАСКАДЕ

¹⁾Темиралиев А.Т., ²⁾Данлыбаева А.К.¹⁾Физико Технический Институт, Алматы, Казахстан²⁾Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби, Алматы

На основе компьютерного моделирования ренорм-группового уравнения кварк-глюонного каскада в сильных взаимодействиях показано наличие хаотической динамики. Проведено сравнение данных распределения множественности вторичных адронов в протон-протонных столкновениях при энергии $\sqrt{s}=62,2$ ГэВ и адронного ливня из отрицательного биномиального распределения кварков и из нормального распределения глюонов. Предсказывается распределения по множественного для энергии Большого Адронного Колайдера при энергии $\sqrt{s}=14$ ТэВ.

ВВЕДЕНИЕ

В числе фундаментальных проблем современной физики сильных взаимодействий является проблема согласованных (коллективных) эффектов в множественных адронных и ядерных процессах. Одним из открытий в области коллективных эффектов является так называемый динамического хаос, который уже используется в самых разных областях науки - космология, теория турбулентности, лазерная физика, химическая кинетика, физика полимеров, теория просачивания жидкости, физиология, физика неустойчивости полупроводников и т.д. [1]. В физике сильновзаимодействующих частиц (адронов) актуальным является исследование нелинейных эффектов в кварк-глюонной (Q-G) эволюции [2]. На основе компьютерного моделирования с использованием нелинейного метода отображений мы показываем возникновение динамического хаоса в Q-G каскаде множественных процессов в сильных взаимодействиях.

Процессы квантовой хромодинамики (КХД) существенно разделены на два типа - пертурбативные и непертурбативные. Непертурбативные эффекты, не поддающиеся расчёту в рамках теории возмущений (ТВ) КХД, описываются нелинейными подходами, так как для Q-G системы не применим принцип суперпозиции "сшивки" взаимодействия множества партонов (кварков и глюонов) из решений двух-партоновых взаимодействий и соответственно не применима ТВ по бегущей константе связи. Поэтому для описания сильных взаимодействий используют некоторые феноменологические построения: в жёстких адронных реакциях с большой передачей импульса - партонный подход, когда партонами считаются глюоны, валентные и морские кварки, слабо взаимодействующие друг с другом; в полужёстких реакциях вместо партонов феноменологически рассматривается обмен гипотетическими реджеонами (квaziчастицы); при малых энергиях взаимодействия бесцветных адронов в теорию для описания взаимодействия вместо глюонов вводят виртуальные частицы типа мезона, померона и т.д. Неодно-

значность учёта нелинейных эффектов привело к большому разнообразию каскадных моделей: внутриядерный, партон-адронный, кварк-партонный, аддитивная кварковая модель, струнная модель лунд. Анализ роли нелинейных эффектов в образовании начальной партонной (кварк-глюонной) конфигурации на ранней стадии соударений проводится в рамках квазиклассических подходов [3].

КВАРК-ГЛЮОННАЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Структурные функции (СФ) нуклонов прежде всего определяются в глубоко неупругих рассеяниях (ГНР) лептонов на нуклонах. Сечения ГНР обычно описываются СФ F_2 и F_L . В области больших квадратах переданного 4-х импульсах Q^2 СФ F_2 может быть выражена через импульсное распределения по доле импульса (x) кварковых $q(x, Q^2)$ и анти-кварковых плотностей в адронах:

$$F_2(x, Q^2) = \sum_i e_i^2 x [q_i(x, Q^2) + \bar{q}_i(x, Q^2)]$$

Q^2 -зависимость экспериментальных данных распределения кварков и глюонов в ГНР в логарифмическом приближении описывается известными интегрально-дифференциальными уравнениями Докшицер-Грибов-Липатов-Алтарели-Паризи (ДГЛАП) [4]. Для нуклонов в ядре уравнение ДГЛАП модифицируется с учётом подавления доминирующего тормозного мягко-глюонного излучения кварками в ядре [5]. В области кварков и глюонов с очень малыми долями импульсов ($x \ll 1$) адрона изменения импульсного распределения партонов описываются известными уравнениями Балицкого—Фадина—Кураева—Липатова (БФКЛ) [6], в которых впервые рассмотрена квадратичная по партонной плотности нелинейность и тем самым учитывалась возможность слияния партонов. В этой области плотность глюонов подобно тормозному излучению и растёт как $1/x$.

Асимптотические значения суммарных импульсов кварков и глюонов в КХД определяются уравнениями:

$$\int_0^1 x q(x) dx \approx \frac{3N_f}{16+3N_f}$$

$$\int_0^1 x g(x) dx \approx \frac{16}{16+3N_f},$$

где: x - доля импульса адрона с плотностью вероятности функции распределения кварков $q(x)$ и глюонов $g(x)$, N_f - число кварковых ароматов (f).

Плотность кварков в адроне с большими долями импульсов $x \rightarrow 1$ обладают, согласно правилам сумм КХД, асимптотическим поведением:

$$q(x) \rightarrow (1-x)^{2n_s-1},$$

где n_s – число валентных кварков “спектаторов”, между которыми в ГНР распределяется оставшаяся часть импульса адрона ($n_s=2$ для нуклонов и $n_s=1$ для мезонов). В области партонов с малыми долями импульсов адрона при $x \ll 1$ асимптотические формулы в пределе полюсов Редже ($\alpha_{\text{ж}}$) дают зависимость вида $x^{\alpha_{\text{ж}}}$, но доказать их в рамках КХД ещё не удалось. Быстрый рост ($\sim 1/x$) распределения тормозных глюонов при малых $x \ll 1$ и морских кварков в адроне должен насыщаться в силу нелинейных Q-G взаимодействий и приводить к «восстановлению» условия унитарности. Q-G распределение в зависимости от поперечного импульса описывается в [7].

Параметризация экспериментальных данных СФ при больших значениях переданных при взаимодействии 4-х импульсов ($Q^2 > 10 \text{ ГэВ}^2$) приводит к следующим соотношениям. Распределение по доли импульса x валентных (u) и (d), морских (s) кварков и глюонов (g) для протона есть: $xu_v(x)=1.8x(1-x)^{2.5}$; $xd_v(x)=3.6x(1-x)^{1.5}$; $xs(x)=0.1(1-x)^6$; $xg(x)=2.76(1-x)^5$ [8]. В данной параметризации импульсное распределение кварков в протоне есть

$$f(x)=1.8x(1-x)^{2.5}+3.6x(1-x)^{1.5}+0.1(1-x)^6 \quad (1)$$

так, что в кварках содержится (0.54) доли импульса и в глюонах почти половина (0.46) импульса протона.

КВАРК-ГЛЮОННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Эволюция партонных распределений в адронных струях во множественных адронных и ядерных процессах описывается теми же уравнениями, что и эволюция структурных функций в ГНР, но эволюция идет во времени-подобной области и описывает поле тормозного излучения. Инвариантная масса исходного партона перераспределяется путем последовательных ветвлений между дочерними партонами с последовательно уменьшающейся виртуальностью. Принципиальным является то, что при высоких энергиях в ядерных (в том числе адронных) столкновениях число партонов становится столь большим, что наряду с каскадным рождением партонов необходимо учитывать и их рекомбинацию, т.е. слияние партонов. Нами используется ренормгрупповой (РГ) подход к эволюции структурных функ-

ций (СФ) адронов. РГ разработана в кантовой теории поля и применено в дальнейшем к критическим явлениям. Ренормгруппа выражает на математическом языке концепцию, что общее поведение системы является объединением множества произвольно определенных подсистем, где каждая подсистема определяется объединением подсистем и так далее. Пусть $f(x)$ представляет собой оператор эволюции динамической системы на некотором временном интервале. Предположим, что удастся подобрать параметры исходной системы так, что посредством масштабных замен переменных можно добиться, чтобы новый оператор эволюции совпадал или почти совпадал со старым. Процедура перехода от старого к новому оператору называется РГ преобразованием, а набор значений параметров задает расположение критической точки. РГ преобразование можно повторять многократно, получая тем самым последовательность операторов эволюции для все больших временных интервалов. В критической точке структура операторов эволюции на больших временах оказывается обусловленной не конкретным видом исходного оператора эволюции, а структурой универсального РГ преобразования. Поскольку получаемые при многократном применении РГ преобразования операторы эволюции одинаковы с точностью до масштабной замены, система демонстрирует на различных временах подобную динамику, проявляя свойство скейлинга.

Эволюция нелинейной динамической системы обычно описывается дифференциальным уравнением или, как недавно вошедшими в обиход исследований, отображениями для дискретных интервалов времени. Мы рассматриваем Q-G эволюцию как марковский процесс с численностью партонов в $(n+1)$ -поколении пропорциональной численности партонов в (n) -ом поколении:

$$x_{n+1}=R f(x_n) \quad n=0,1,2,\dots \quad (2)$$

с R – параметром эволюции Q-G системы. Данное отображение представляет собой эволюцию импульсного распределения партонов в адронах: $f(x)=xq(x)$ с плотностью вероятности партонов $q(x)$ с долей импульса x и связано с конкурирующими процессами кварк-глюонного рождения и слияния. Положительные члены уравнения (2) с $f(x_n)$ из (1) описывают увеличение числа партонов, а отрицательные их уменьшение за счёт процессов кварк-антикваркового, кварк-глюонного или глюон-глюонного слияний. Таким образом, в уравнении (2) существенную роль играют не только члены линейные по партонной плотности, но и более высоких порядков.

Численные расчёты отображения (2) показали, что в области малых значений параметра эволюции R ($R < 0.1$) происходит «вымирание» партонов с любым начальным значением доли импульса x_0 . При увеличении параметра R наблюдается переход в установившейся режим, когда число кварков и глюо-

нов перестаёт меняться, т.е. наступает равновесие рождения и рекомбинации партонов. Траектории в фазовом пространстве эволюции партонов после переходного процесса достигают некоторого устойчивого значения (неподвижной точки). При $R \sim 0.5$ после переходного процесса орбита отображения становится строго периодической с периодом два (би-

фуркация неподвижной точки). При фиксированном значении R после переходного периода траектории x_i не зависят от начального значения x_0 . При больших значениях величины R траектории партонов представляют собой более сложное движение. Эти разные по характеру орбиты показаны на рисунке 1:

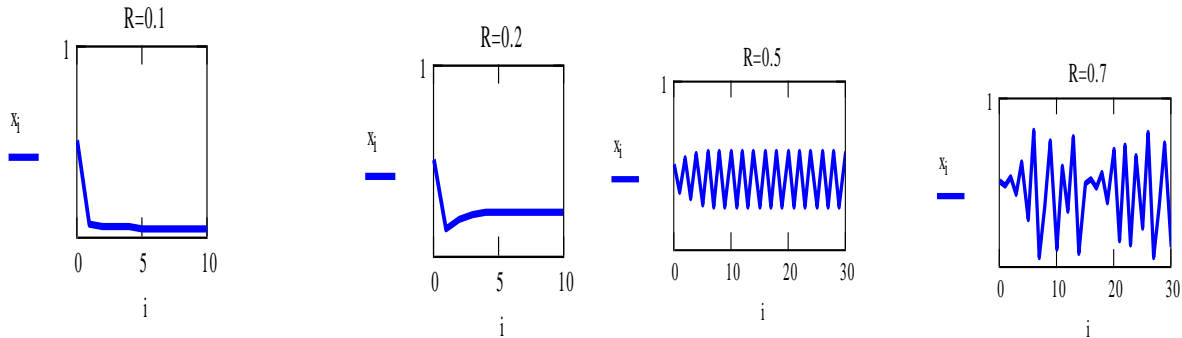


Рисунок 1. Затухающая, стационарная, периодическая и хаотическая траектории

АТТРАКТОРЫ И ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА

Изменение характера траектории наглядно демонстрирует график зависимости $x_{i,j} = f(x_{i-1}, R_j)$ при итерациях параметра эволюции $R_j = 0.99j/500 = 0 \div 0.99$, где i – количество точек по переменной x (число итераций), j – число значений по переменной R_j . При больших значениях R наблюдается переход системы в хаотический режим, когда две близкие точки разбегаются по разным траекториям, что продемонстрировано на рисунке 2 из которой видно бифуркации (раздвоения траекторий) и аттракторы как притягивающие множества.

Для отличий хаотического и нехаотического режимов сравниваем орбиты с близкими начальными условиями в этих режимах. В качестве меры этого отличия выбираем модуль разности между значениями соответствующих орбит отображения, отнесенный к значению одной из орбит. В нехаотическом режиме отличие в траекториях проявляется в переходном режиме, причем ее величина не превосходит 0.0015%. В хаотическом режиме происходит «разбегание» траекторий, связанной с аномальным

ростом флуктуаций в кварк-глюонной системе при определённых значениях параметра эволюции. Вблизи точек бифуркации Q-G система испытывает сильные флуктуации. В хаотическом режиме возникает спонтанный переход: кварки и глюоны будут объединяться в сильно-взаимодействующие кластеры т.е. адроны и как говорят в нелинейной теории, возникает параметр порядка. На рисунке 3 для $R=0.725$ аттракторы траекторий равны 0.728 и 0.349: Анализ значений параметра эволюции R и производных $Der(x, R) := \frac{d}{dx} f(x, R)$ указывает, что по мере роста R значение модуля производной функции приближается к 1. То есть неподвижная точка функции $f(x, R)$ становится неустойчивой, что и приводит к рождению (бифуркации) с периодом 2. Так как после бифуркации только после каждой второй итерации аттрактор функции $f(x, R)$ принимают то же самое значение, то значения аттрактора функции $f(x, R)$ являются неподвижными точками функции $g(x, R) = f(f(x, R), R)$, что показано на рисунке 4.

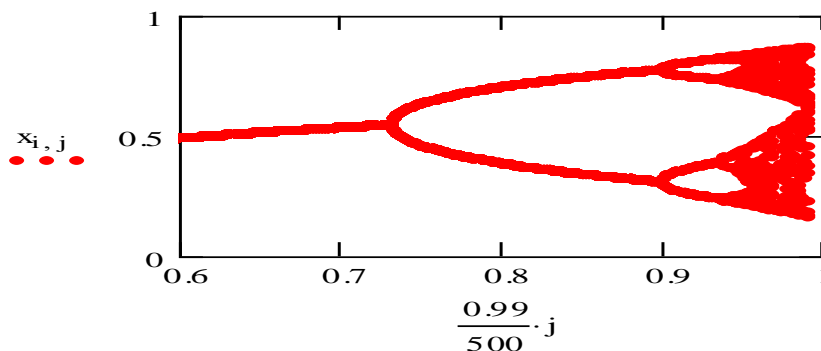


Рисунок 2. Аттракторы как притягивающие множества фазового пространства

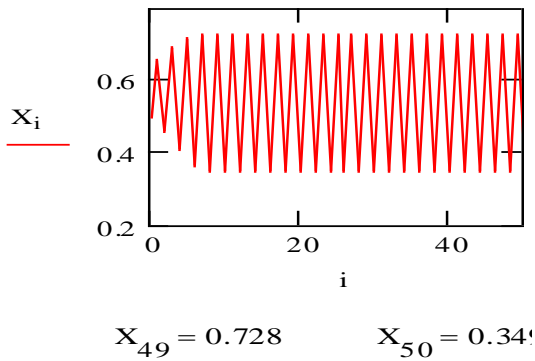


Рисунок 3. Периодическая траектория

Сравнение численных значений аттрактора функции $f(x,R)$ и неподвижных точек функции $g(x,R) = f(f(x,R), R)$ указывает, что неподвижные точки функции $g(x,R)$ совпадают со значениями аттрактора функции $f(x,R)$. По мере увеличения параметра эволюции R неподвижные точки функции $g(x,R)$ станут неустойчивыми, что приведёт к бифуркации с появлением аттрактора с периодом 4.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО МНОЖЕСТВЕННОСТИ

Существенной особенностью эволюции партонных распределений в адронных струях является ее масштабная инвариантность, следствием которой является KNO-скейлинг распределений по множественности партонов, когда в пределе высоких энергий высшие моменты распределения партонов по множественности (n) пропорциональны их средней множественности $\langle n \rangle$ с коэффициентом, не зависящим от энергии. Глюоны в КХД рождаются в результате тормозного излучения кварков и имеют нормальное распределение $dnorm(x, \mu, \sigma)$ как по направлениям сталкивающихся адронов так и по направлениям выбитых цветных кварков и глюонов. Множественность адронов в кварковой струе описывается отрицательным биномиальным распре-

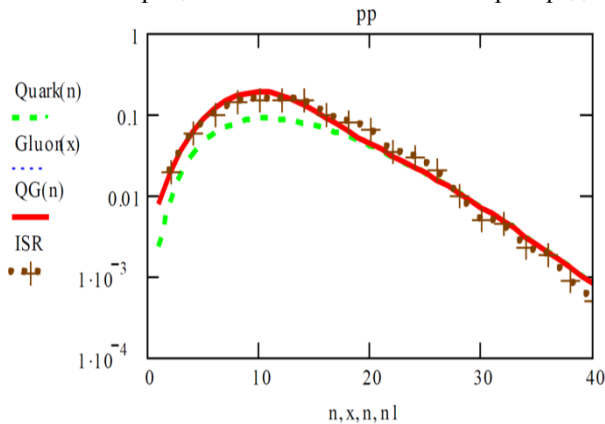


Рисунок 5. Распределение множественности при энергии ISR

$$g(x, R) := f(f(x, R), R)$$

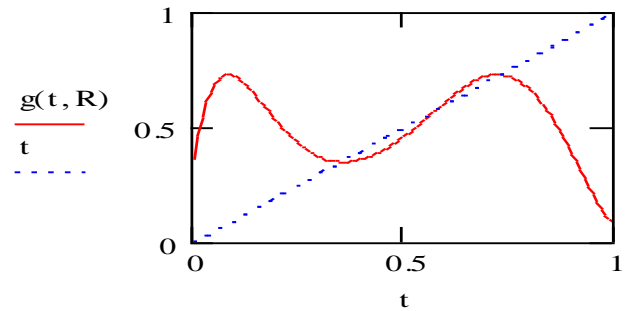


Рисунок 4. Ренорм-групповая связь

лением (ОБР) $dnbinom(k,n,p)$. На рисунке 5 представлено описание множественности для протон-протонных (pp) столкновений при энергии экспериментов ISR $\sqrt{s} = 62,2$ ГэВ с плотностью вероятности ОБР $p=0.72$, равному значению вероятности аттрактора при бифуркации в отображении (1) и параметром формы $k=4$ согласно соотношению в ОБР: $k = \langle n \rangle (1-p)/p = 4$ при средней множественности для энергии ISR $\langle n \rangle = 11$. Вероятность $QG(n)$ представляет собой сумму ОБР $dnbinom(k,4,0.72)$ вторичных адронов из кварковой плотности $Quark(n)$ и нормального распределения глюонной плотности $Gluon(x)$ с $\mu = 30$, $\sigma = 11$ при средней множественности $\langle n \rangle = 11$. На рисунке 6 представлено предсказание для множественности адронов в протон-протонных (pp) столкновениях большого адронного коллайдера (LHC) с энергией $\sqrt{s} = 14$ ТэВ [9] и плотностью вероятности $p=0.97$ в ОБР при среднем числе адронов $\langle n \rangle = 70$ и параметре формы $k = \langle n \rangle (1-p)/p = 0.1$: Функция P_n представляют собой сумму кваркового $Q(n)$ и глюонного $G(n)$ вкладов во множественность вторичных адронов.

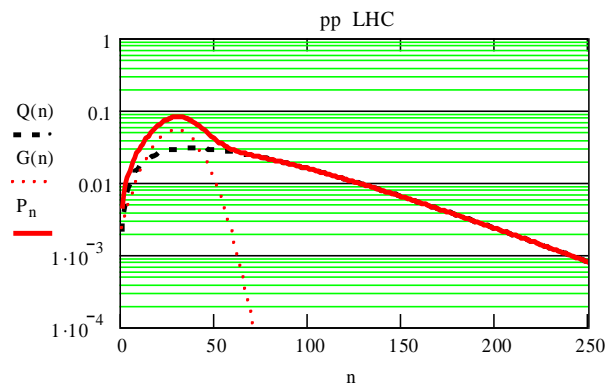


Рисунок 6. Распределение множественности при энергии LHC

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нелинейность Q-G импульсной структуры адрона приводит к хаотической динамике в Q-G каскаде с аттракторами траекториями, концентрирующими кварки и глюоны. Каскад чувствителен к импульсному Q-G распределению в адроне и малое его изменение нарастает со временем и система ведет себя хаотически. Бифуркации как спонтанный уход от равновесия с раздвоением траектории приводят к качественному и количественному переходу в распределении по множественности вторичных частиц. Динамический хаос, возникающий из-за нелинейности Q-G импульсного распределения в адроне, приводит к эффектам согласованного (коллек-

тивного) кварк-глюонного поведения. Нелинейность каскада с конкурирующими процессами слияниями и расщеплениями кварков и глюонов является источником создающей структуру. Динамический хаос в кварк-глюонной эволюции может быть причиной таких экспериментально наблюдаемых закономерностей как масштабной инвариантность, КНО скейлинг, фрактальность, таких аномалий как специфическое угловое распределение с двумя максимумами вокруг направления движения адронной струи или кольцевая структура распределения вторичных адронов в плоскости перпендикулярной направлению движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фейгенбаум, М. Универсальное поведение нелинейных систем // УФН. - 1983. -Т. 141, вып.3. - С. 343-374.
2. Мангано, М.Л. Квантовая хромодинамика и физика адронных столкновений // УФН. - 2010. -Т. 180, вып.11. - С. 113-138.
3. Дремин, И.М., Леонидов, А.В. Кварк-глюонная среда // УФН. -2010. - Т.180, вып. 11. - С.1167.
4. Kovchegov, Yu., Mueller, A. Non-perturbative computation of gluon minijet productions to Single-Particle Inclusive Cross Sections // Nucl. Phys. - 1998. -Vol. 329. -P. 451.
5. Gribov, V.N., Lipatov, L.N Deep inelastic ep scattering in perturbation theory // Sov. J. Nucl. Phys. - 1972. -Vol.15. -P. 438.
6. Altarelli, G., Parisi, G. Covariant perturbation theory // Nucl. Phys. - 1977. -Vol.126. -P. 298.
7. Temiraliyev, A.T. Soft gluon emissions and nuclear EMC effect // Sov.J.Nucl.Phys. - 1991. -Vol.54. -P. 190.
8. Kuraev, E.A., Lipatov, L.N., Fadin, V.S. Scattering amplitudes at high energies and anomalous dimensions of local operators in QCD // Sov. JETP. - 1976. -Vol.44. -P. 443.
9. Balitsky, I. I., Lipatov, L.N. The pomeron singularity in quantum chromodynamics // Sov. J. Nucl. Phys. - 1978. -Vol.28. -P. 822.
10. Lipatov, L.N Deep inelastic e p scattering in perturbation theory // Sov. Phys. JETP. - 1986. -Vol.63. -P. 904.
11. Cherednikov, I.O., Stefanis N.G. Evolution of transverse-momentum-dependent densities // -2011. arXiv: 1104.0168
12. Adloff, C. Measurement of open beauty production at HERA // Eur.Phys.J. / hep-ex/9908059. - 2000. -Vol.13. -P. 609.
13. Партоны и партоновые плотности [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://elementy.ru/LHC/HEP/experiments/partonic_densities //

КВАРК-ГЛЮОНДЫ КАСКАДА ДИНАМИКАЛЫҚ БЕЙСЫЗЫҚТЫҚ

¹⁾Темірәлиев А.Т., ²⁾Даңлыбаева А.К.

¹⁾Физика-техникалық институт, Алматы, Қазақстан

²⁾Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы

Адрондық әрекеттестіктерде кварк-глюондық каскадты компьютерлік үлгілеудің негізінде хаустық динамиканың бар екендігі корсетілді. $\sqrt{s} = 62,2$ Гэв энергиясы кезінде протон-протондық соқтығысуда екінші адрондардың көпмүшелігінің таралу мәліметтеріне және кварктың теріс биномиальды таралуындағы адрондық жауынымен глюондардың қалыпты таралуына салыстыру жүргізілді. $\sqrt{s} = 14$ Тэв энергияда Үлкен Адрондық Колайдер энергиясы үшін көпмүшелік бойынша таралуы болжанады.

DINAMIC NONLINEARITY IN QUARK-GLUON CASCADE

¹⁾A.T. Temiraliyev, ²⁾A.K. Danlybaeva

¹⁾Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan

²⁾Al-Farabi Kazakhstan National University, Almaty

On the base of computer simulation of quark-gluon cascade in hadron interactions it was shown the existing of chaotic dynamics. The data of secondary hadrons multiplicity distributions in proton-proton collisions at energy $\sqrt{s} = 62,2$ Gev are compared with hadrons shower from quark's negative binomial distributions and gluon's normal distributions. Multiplicity distributions at Large Hadron Collider with energy $\sqrt{s} = 14$ Tev are predicted.

УДК 550.344 + 550.34

НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН И КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

¹⁾Копничев Ю.Ф., ²⁾Соколова И.Н.

¹⁾Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

²⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Рассматривается корреляция между неоднородностями поля поглощения S-волн и кольцевыми структурами сейсмичности в районе Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Поглощение S-волн в литосфере оценено по отношению амплитуд в волнах Sn и Pn. Обработано около 140 записей землетрясений, полученных станцией Улан-Батор (ULN) на расстояниях ~400 - 1300 км. Выделены зоны высокого поглощения на крайнем юго-западе и северо-востоке оз. Байкал. Самая большая область промежуточного поглощения, расположенная в рифтовой зоне, находится в центральной части озера. После 1975 г. в районе БРЗ сформировались три кольцевые структуры сейсмичности с пороговыми значениями магнитуд $M_p=4.2 - 4.7$. Эти структуры проходят через зоны повышенного и промежуточного поглощения S-волн в районе оз. Байкал. По размерам колец сейсмичности ($L=150 - 310$ км) и величинам M_p оценены магнитуды возможных сильных землетрясений в областях кольцевых структур.

В работах [1 - 6] показано, что с очаговыми зонами сильных землетрясений в континентальных районах связаны аномалии высокого поглощения короткопериодных S-волн в литосфере. Установлено также, что перед многими межплитными событиями с $M>6.0$ формируются кольцевые структуры сейсмичности [7, 8]. Это позволяет выделять зоны подготовки возможных сильных коровых землетрясений по неоднородностям поля поглощения и характеристикам сейсмичности. Кроме того, по параметрам кольцевых структур можно оценивать магнитуды готовящихся событий [8]. В статье приводятся

результаты попытки выделения зон подготовки возможных сильных землетрясений в районе Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) с помощью указанного подхода.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Начиная с 1800 г. в районе БРЗ произошло 4 сильных землетрясения с $M \geq 7.0$ (рисунок 1, таблица 1). Кроме того, с начала XX-го века здесь зарегистрировано 7 событий с $6.5 \leq M < 7.0$ [9]. Последнее из них - Средне-Байкальское ($M=6.8$), - произошло еще в 1959 г.

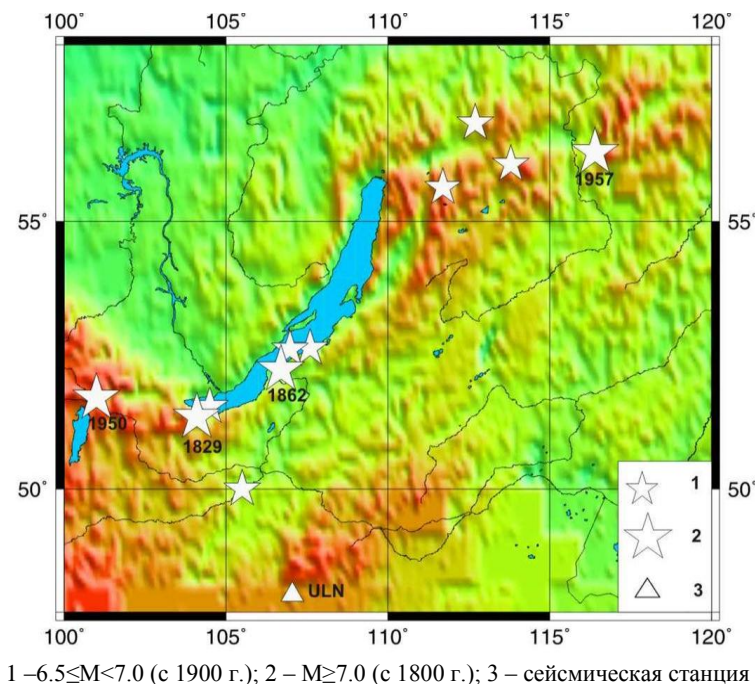


Рисунок 1. Эпицентры сильных землетрясений в районе Байкальской рифтовой зоны РЗ (к северу от 50° N)

**НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН И КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ
СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ**

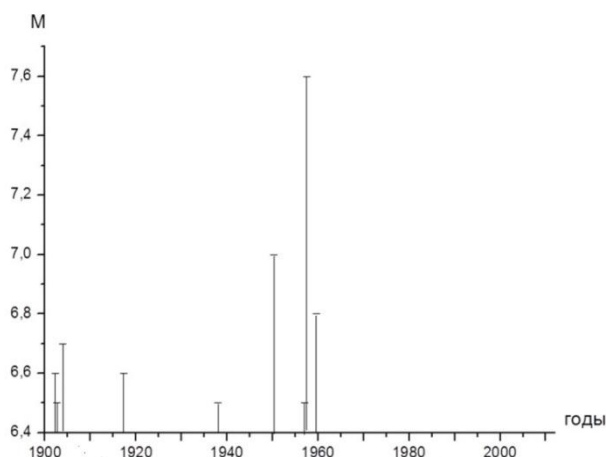


Рисунок 2. Зависимость магнитуд сильных землетрясений в районе БРЗ от времени начиная с 1900 г.

Таблица 1. Сильные землетрясения в районе БРЗ

Год	Месяц	День	Широта, ° N	Долгота, ° E	M
1829	3	7	51.4	104.1	7.5
1862	1	12	52.3	106.7	7.5
1902	4	11	51.6	104.5	6.6
1902	8	17	56.7	112.7	6.5
1903	11	26	52.7	107.6	6.7
1917	4	29	56.0	113.8	6.6
1937	12	25	55.6	111.7	6.5
1950	4	4	51.77	101.0	7.0
1957	2	6	50.0	105.5	6.5
1957	6	27	56.2	116.4	7.6
1959	8	29	52.68	106.98	6.8

Все такие события, произошедшие в XX-м веке, группируются в две относительно короткие серии длительностью 15 лет и 22 года (1902 - 1917 и 1937 - 1959 гг. (рисунок 2). После 1959 г. здесь не зарегистрировано землетрясений с $M > 6.3$. Учитывая эти данные, можно предполагать, что в рассматриваемом районе идет подготовка нескольких достаточно сильных сейсмических событий.

МЕТОДИКА

Картирование поля поглощения S-волн в литосфере БРЗ проводилось по записям станции Улан-Батор (ULN) – (рисунок 1). Использовался метод, основанный на анализе отношений амплитуд волн Sn и Pn (параметра $Ig(ASn/APn)$, который для краткости будем обозначать как Sn/Pn). Эти волны проникают в верхнюю мантию и по параметру Sn/Pn при прочих равных условиях можно судить о степени поглощения S-волн в нижней коре и верхах мантии в области эпицентра [2 - 5, 10]. Для того чтобы учесть зависимость добротности среды от частоты колебаний, применялась узкополосная фильтрация (фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы [11]).

При картировании поля поглощения рассматривалась корреляционная зависимость параметра Sn/Pn от расстояния. Определялись отклонения индивидуальных значений параметра от корреляционной зависимости $\Delta Sn/Pn$ (при этом самые высокие

значения $\Delta Sn/Pn$ соответствуют пониженному поглощению, а самые низкие – повышенному).

Кольцевые структуры сейсмичности выделялись в первую очередь в областях высокого поглощения S-волн или поблизости от них. Методика выделения таких структур имеет следующие особенности [12 - 14].

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

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

3. Производится перебор пороговых величин 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.

4. Регулярно (примерно раз в год) контролируются параметры сейсмичности, поскольку известны случаи, когда за последние 1 - 2 года проявлялись новые кольцевые структуры с гораздо большими величинами M_p , как это было, например, перед Великим землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. [14].

5. По размерам больших осей колец сейсмичности L и величинам M_p с учетом преобладающего механизма очага в рассматриваемом континентальном районе производится оценка магнитуды возможного сильного землетрясения [8].

С учетом перечисленного, проанализированы данные о сейсмичности, полученные за период 01.01.1973 – 01.07.2012 гг. Поскольку в районе БРЗ очаги землетрясений расположены в основном на малых глубинах, рассмотрены события только в диапазоне 0 - 33 км из каталогов NEIC (National Event Information Center -каталог Геологической службы США).

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Картирование поля поглощения S-волн. На рисунке 3 показана зависимость параметра S_n/P_n от эпицентрального расстояния. Каждая точка представляет среднее значение, полученное для площадки с линейными размерами несколько десятков км. Это позволяет в значительной степени устранить погрешности, связанные с различием диаграмм направленности P и S волн для разных событий [2 - 5].

Из рисунка 3 следует, что в среднем величины S_n/P_n уменьшаются с расстоянием. Корреляционная зависимость $S_n/P_n(\Delta)$ описывается выражением:

$$S_n/P_n \sim 1.02 - 3.75 \times 10^{-4} \Delta \text{ (км)} \quad (1)$$

Наибольший разброс данных наблюдается на меньших расстояниях, при этом самые большие величины S_n/P_n получены для эпицентров, расположенных на южной окраине древней Сибирской платформы.

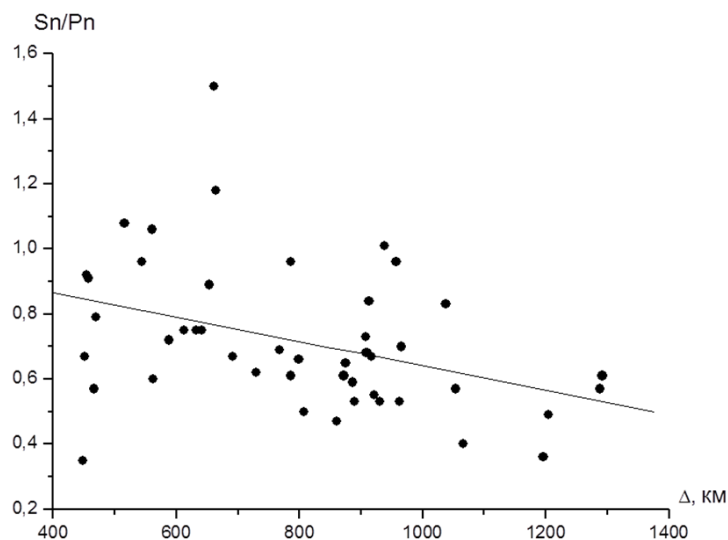
Были рассмотрены величины $\Delta S_n/P_n$, представляющие отклонения от средней зависимости (1). Все значения этих отклонений были разбиты на три уровня, соответствующие пониженному ($\Delta S_n/P_n >$

0.15), промежуточному ($-0.15 \leq \Delta S_n/P_n \leq 0.15$) и повышенному ($\Delta S_n/P_n < -0.15$) поглощению.

На рисунке 4 представлена карта поля поглощения в районе БРЗ, построенная по данным ст. ULN. На карте, помимо средних значений $\Delta S_n/P_n$, нанесены также несколько точек, соответствующих индивидуальным значениям этого параметра (в тех случаях, когда было недостаточно данных для осреднения). Из рисунка 4 следует, что южной окраине Сибирской платформы соответствует пониженное, а району Забайкалья – промежуточное и пониженное поглощение. В собственно рифтовой зоне наблюдается большой контраст поля поглощения. Сильное поглощение имеет место на крайнем юго-западе оз. Байкал, западнее (в области Тункинской впадины) поглощение уменьшается. Еще одно пятно высокого поглощения выделяется на северо-восточной окраине озера и на малом удалении к востоку от него. Небольшие зоны низких величин $\Delta S_n/P_n$ проявились на юге оз. Хубсугул, а также на восточной окраине БРЗ (между 115° и 118° E).

Самая большая область промежуточного поглощения приурочена к центральной и северо-восточной частям оз. Байкал. Меньшие по размеру области выделяются к северо-востоку от озера, а также на восточной окраине рифтовой зоны. Кроме того, небольшие пятна промежуточного поглощения проявились в области Тункинской впадины, на юго-западе оз. Байкал и в области Северо-Муйского хребта.

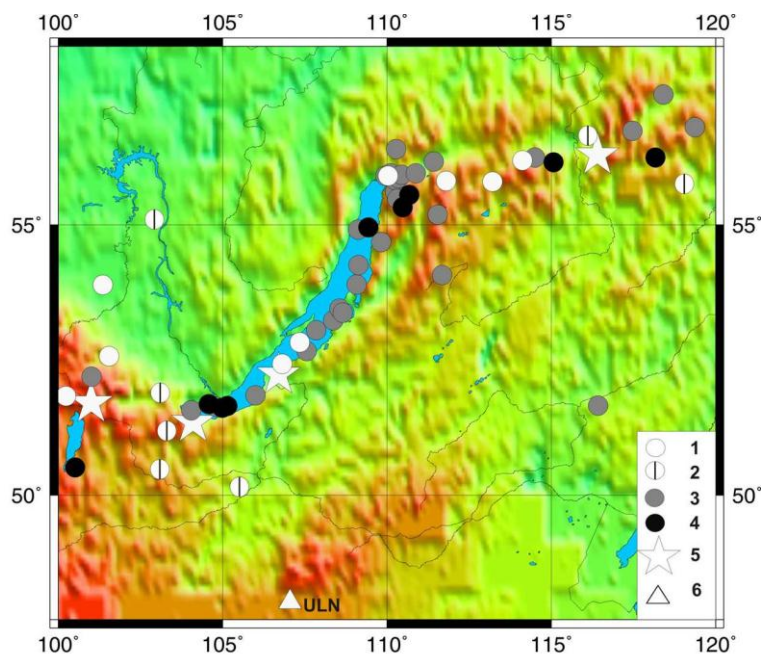
Пониженное поглощение соответствует области к северу от оз. Хубсугул, центральной части оз. Байкал (около 107° E), области Северо-Муйского хр. и к югу от него (между 111° и 114.5° E), а также между зонами низких величин $\Delta S_n/P_n$ на крайнем востоке БРЗ (по записи одного события).



Прямая – корреляционная зависимость (1)

Рисунок 3. Зависимость $S_n/P_n(\Delta)$ для района БРЗ

НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН И КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ
СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

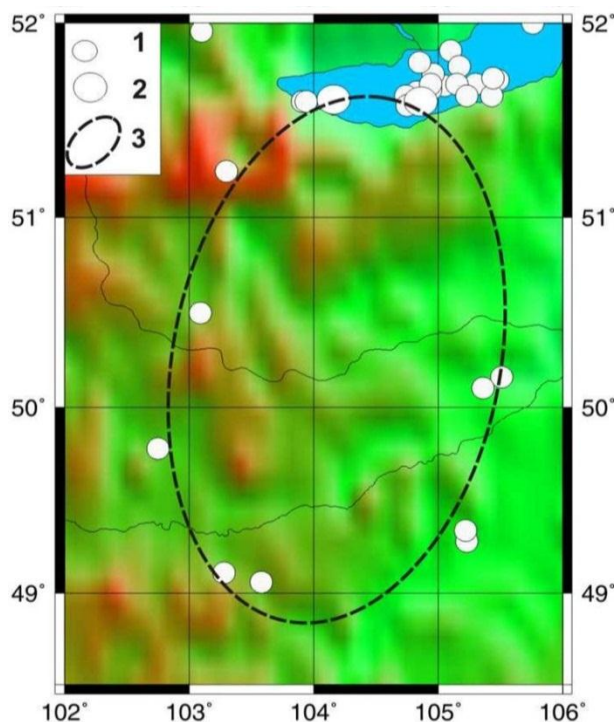


Поглощение: 1, 2 – пониженное (2 – одиночные значения Sn/Pn); 3 – промежуточное; 4 – повышенное; 5 – эпицентры сильных землетрясений ($M \geq 7.0$, начиная с 1800 г.); 6 – сейсмическая станция

Рисунок 4. Карта поля поглощения в районе Байкальской рифтовой зоны

Характеристики кольцевой сейсмичности. Учитывая связь неоднородностей поля поглощения и характеристик сейсмичности, обусловленную миграцией глубинных флюидов [7], мы рассматривали кольцевые структуры в первую очередь в областях относительно пониженных величин Sn/Pn и поблизости от них. На рисунке 5 показаны характеристики

сейсмичности в области южного Байкала и к югу от него. Начиная с 1987 г. здесь сформировалась кольцевая структура ($M_p=4.2$), вытянутая в субмеридиональном направлении (длина ее большой оси $L \sim 310$ км). Северная часть кольца сейсмичности проходит через зону высокого поглощения на юго-западной окраине озера.



1 - $6.0 > M \geq 4.2$. 2 - $M \geq 6.0$. 3 – кольцо сейсмичности (здесь и Байкала и к югу от него на рисунках 7, 9)

Рисунок 5. Кольцевая сейсмичность в области южного Байкала и к югу от него

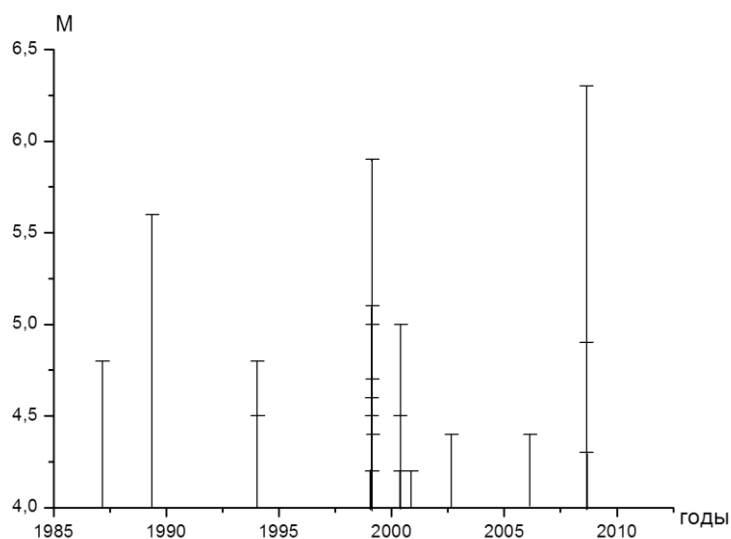


Рисунок 6. Зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры

Рисунок 6 иллюстрирует зависимость магнитуд событий в области кольцевой структуры от времени. График $M(T)$ имеет Ш-образную форму; максимальные скорости сейсмотектонической деформации (СТД) наблюдались в 1987 - 1994 и 1999 - 2008 гг. Самые сильные землетрясения произошли здесь в 1999 ($M=6.0$) и 2008 гг. ($M=6.3$).

На рисунке 7 показаны характеристики сейсмичности в северо-восточной части оз. Байкал, где расположена самая большая область с промежуточными значениями поглощения.

В данном случае сформировалась менее четко выраженная кольцевая структура, вытянутая вдоль озера в северо-северо-восточном направлении ($M_p=4.7$, $L\sim 170$ км). Из рисунка 8 следует, что зависимость $M(T)$ для этой структуры также имеет Ш-образную форму; наибольшие скорости СТД имели место в 1981 - 1992 и 2006 - 2010 гг. Самые сильные события с магнитудой 5.3 и 5.5 произошли здесь соответственно в 1992 и 2010 гг.

Еще одна кольцевая структура проявилась на северо-восточном окончании оз. Байкал (рисунок 9).

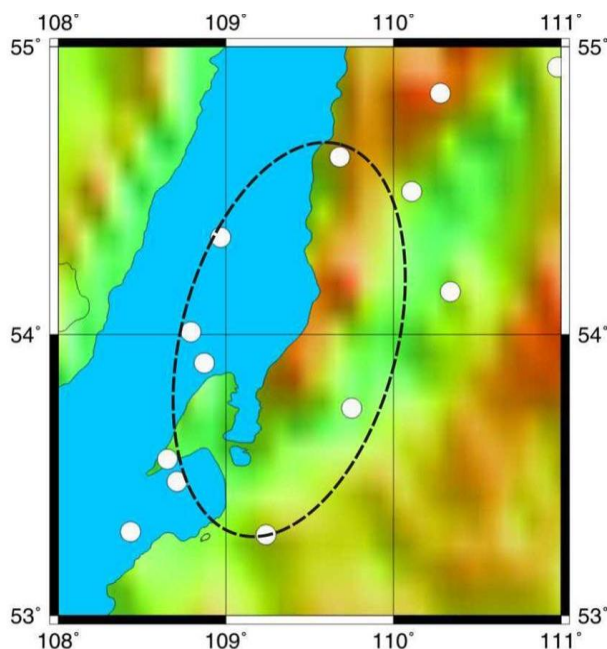


Рисунок 7. Кольцевая сейсмичность в северо-восточной части оз. Байкал. $M_p=4.7$

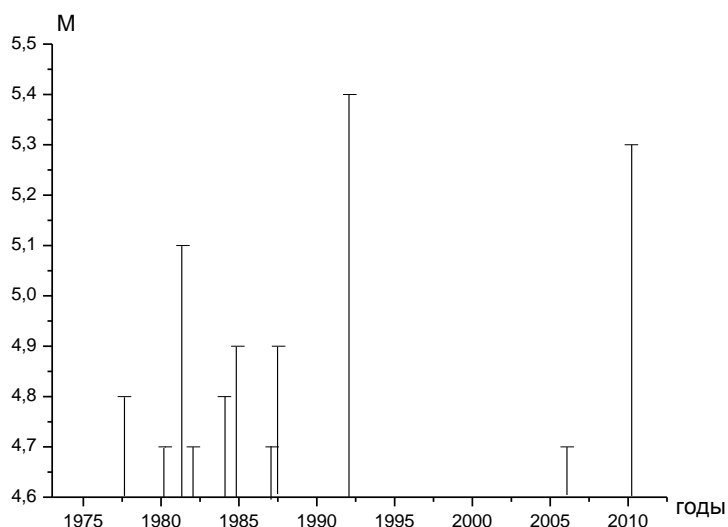


Рисунок 8. Зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры

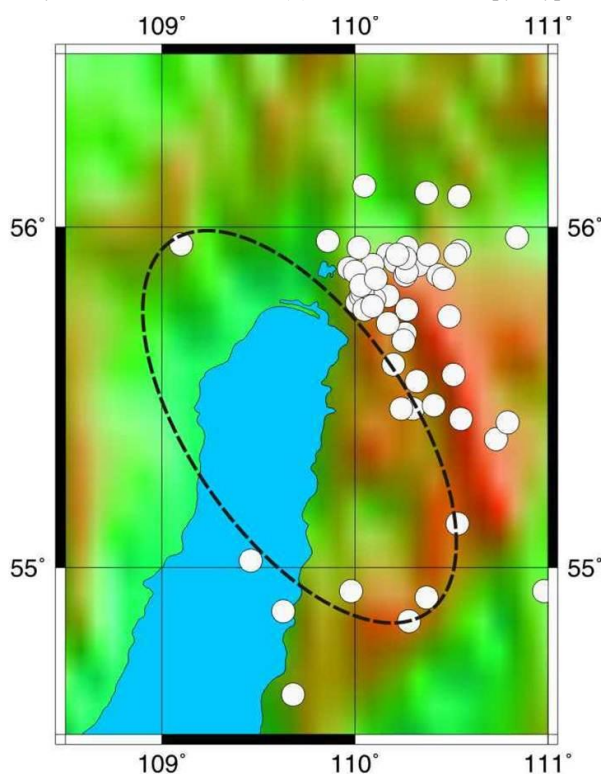


Рисунок 9. Кольцевая сейсмичность в области северо-восточного окончания оз. Байкал и к востоку от него. $M_p=4.4$

Кольцо сейсмичности ($M_p=4.4$, $L \sim 150$ км) вытянуто в северо-северо-западном направлении. На рисунке 10 показана зависимость $M(T)$ для этой структуры. Видно, что скорость СТД резко выросла в 1999 - 2007 гг.; наибольшие магнитуды событий составляли 5.3 и 5.5 (в 1999 и 2007 гг.). Оценка магнитуд возможных сильных землетрясений в областях кольцевых структур была проведена на основании результатов, полученных в [8]. В [8] получены корреляционные зависимости $IgL(M_w)$ и $M_p(M_w)$ для внутриконтинентальных событий, а также пока-

зано, что они существенно варьируются для разных типов подвижек в очаге. Для механизмов типа сброса и сбросо-сдвига, которые доминируют в районе БРЗ [15], получены следующие зависимости:

$$IgL \text{ (км)} = 0.38 + 0.28M_w \quad (2),$$

$$M_p = -0.19 + 0.64M_w \quad (3).$$

С использованием формул (2) и (3) проведена оценка магнитуды возможных сильных землетрясений в областях кольцевых структур (таблица 2).

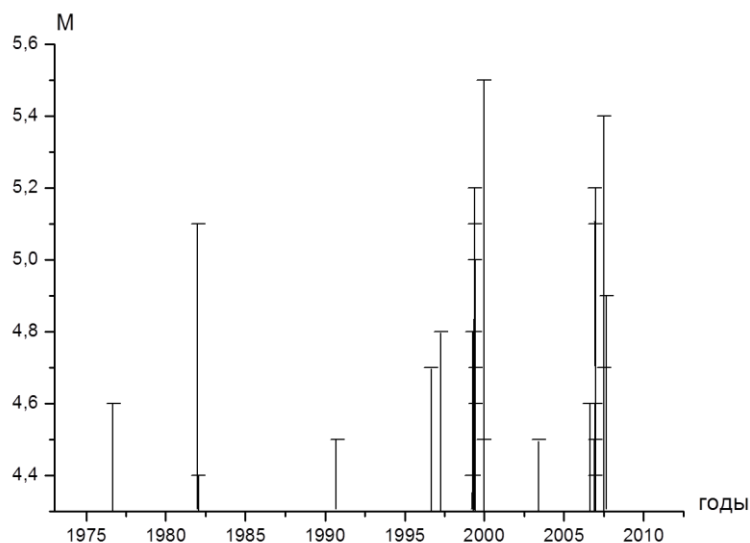


Рисунок 10. Зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры

Таблица 2. Характеристики кольцевых структур в районе БРЗ

°N	°E	L, км	Mп	ΔT, лет	Mw
48.5-52.0	102.0-106.0	310	4.2	25	7.2±0.3
53.0-55.0	108.0-111.0	170	4.7	35	7.1±0.5
54.5-56.5	108.5-111.0	150	4.4	36	6.8±0.4

Из таблицы 2 следует, что средние величины M_w варьируются от 6.8 до 7.2, уменьшаясь в направлении с юго-запада на северо-восток. Следует отметить, что точность оценки этих величин наибольшая для кольца сейсмичности, приуроченного к юго-западной окраине оз. Байкал. Текущая длительность времени формирования кольцевых структур ΔT варьируется от 25 до 36 лет.

ОБСУЖДЕНИЕ

Из приведенных данных следует, что в целом поглощение короткопериодных S-волн в литосфере районов БРЗ и Забайкалья сравнительно слабое, несмотря на проявления сравнительно молодого (четвертичного) вулканизма [16]. Это согласуется с предварительными данными, полученными авторами ранее [17]. Сопоставление с результатами, полученными в [2 - 5], показывает, что средний уровень параметра Sn/Pn при прочих равных условиях здесь значительно выше, чем в районах Центральной Азии.

Рассмотрим теперь связь аномалий поля поглощения с исторической сейсмичностью. Из рисунков 1 и 4 следует, что очаг Мондинского землетрясения 1950 г. ($M=7.0$) приурочен к области слабого поглощения S-волн в области оз. Хубсугул. Относительно эпицентров землетрясений 1829 г. ($M=7.5$) и 11.04.1902 г. ($M=6.6$), ввиду низкой точности их определения, можно лишь сказать, что они находятся вблизи области большого контраста поглощения на юго-восточной окраине оз. Байкал. Очаги сильных землетрясений: Цаганского 1862 г. ($M=7.5$), Байкальского 1903 г. ($M=6.7$) и Средне-Байкальского 1959 г. ($M=6.8$) коррелируются с областью понижен-

ного поглощения в центральной части оз. Байкал. Эпицентры землетрясений 17.08.1902 г. ($M=6.5$), 1917 г. ($M=6.6$) и 1937 г. ($M=6.5$) находятся в обширной области высоких величин Sn/Pn , приуроченной к Северо-Муйскому хр. И наконец, очаг Муйского землетрясения 1957 г. ($M=7.6$) также расположен в области сравнительно слабого поглощения (хотя и выделенной по малому количеству данных). Отсюда следует, что очаги сильных землетрясений в районе БРЗ, которые произошли с середины XIX-го до середины XX-го века, как правило, связаны с областями пониженного поглощения в литосфере. Этот вывод согласуется с полученными ранее данными, которые говорят о том, что после сильных коровых землетрясений в течение нескольких десятков лет резко ускоряется подъем глубинных флюидов в литосфере [1, 6, 15] (как отмечено в [6], одна из важных функций таких событий заключается именно в высвобождении легкой жидкой фазы, что в конечном счете приводит к уменьшению потенциальной энергии Земли).

В то же время в областях высокого поглощения S-волн, по крайней мере с 1830 г., не зарегистрированы события с $M \rightarrow 7.0$. Существенно, что к самым крупным аномалиям с низкими величинами Sn/Pn привязаны две из трех выделенных кольцевых структур. Еще одна кольцевая структура расположена в самой большой области промежуточных значений поглощения S-волн. По аналогии с данными, полученными ранее для других внутриконтинентальных районов [7, 8], можно предполагать, что с этими кольцевыми структурами связаны зоны под-

готовки сильных землетрясений. Учитывая данные об исторической сейсмичности [9], можно ожидать, что эпицентры будущих сильных событий, скорее всего, должны будут располагаться в районе оз. Байкал или его ближайших окрестностях. При этом наибольшую опасность будет представлять сильное землетрясение, которое может произойти в области южного Байкала вблизи зоны высокого поглощения, где находится крупный промышленный и научный центр – г. Иркутск. Вблизи той же самой северной кольцевой структуры проходит трасса БАМ, а также линия нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан.

Текущие длительности формирования двух северных колец сейсмичности (35 и 36 лет) близки к максимальным величинам ΔT , известным в настоящее время (~40 лет [7, 8, 12, 13]). В связи с этим сильные землетрясения, которые могут готовиться в этих областях, в ближайшие годы наиболее вероятны. В то же время событие, которое, по нашим данным, готовится в области южного Байкала, скорее всего, может произойти несколько позже. Тем не менее, во всех трех областях целесообразно вести постоянный мониторинг различных геофизических и геохимических параметров с целью среднесрочного прогноза сильных сейсмических событий.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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, 2010а. – Т.433, № 6. – С. 808-812.
3. 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.
4. 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
5. 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.
6. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в верхней мантии сейсмически активных и слабосейсмичных районов / Ю.Ф. Копничев, Д.Д. Гордиенко, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2009. – № 1. – С. 49 - 64.
7. 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.
8. Kopychev, Yu.F. Ring-shaped seismicity structures, being formed prior to large earthquakes with different faulting types in continental regions / Yu.F. Kopychev, I.N. Sokolova // Book of Abstracts. 33rd General Assembly of ESC. 2012. – Moscow-Obninsk, Russia. – P. 182.
9. Кондорская, Н.В. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР / Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин (ред.). // М.: Наука, 1977. – 535 с.
10. Molnar P. Lateral variations of the upper mantle and discontinuities in the lithosphere / P. Molnar, J.Oliver // J. Geophys. Res. 1969. – V. 74. – P. 2648 - 2682.
11. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М.: Наука. 1985. – 176 с.
12. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // ДАН, 2009. – Т. 429, № 1. – С. 106 - 109.
13. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин в регионе Южной Америки / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2010. – Вып. 1. – С. 100-110.
14. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11 марта 2011 г. ($M_w=9.0$) в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // ДАН, 2011. – Т. 440, № 2. – С. 246 - 249.
15. Husen S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile / S. Husen, E. Kissling // Geology, 2001. – V. 29, N 9. – P. 847 - 850.
16. Рассказов, С.В. Магматизм Байкальской рифтовой системы. 1993 / С.В. Рассказов, Н.А. Логачев // Н.: Наука. – 286 с.
17. Копничев, Ю.Ф. Новые данные о строении верхней мантии Байкальской рифтовой зоны // ДАН, 1992. – Т. 325, № 5. – С. 944 - 949.
18. Tapponnier, P. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia and Baykal regions / P. Tapponnier, P. Molnar // J. Geophys. Res, 1979. – V. 84. – P. 3425 - 3459.

**БАЙКАЛ РИФТИК ЗОНАСЫ АУДАНЫНДА S-ТОЛҚЫНДАР ЖҰТЫЛУ ӨРІСІНІҢ БІР ТЕКТИ
ЕМЕСТІГІ ЖӘНЕ СЕЙСМИКАЛЫЛЫҚТЫҢ САҚИНАЛЫ ҚҰРЫЛЫМДАРЫ**

¹⁾Копничев Ю.Ф., ²⁾Соколова И.Н.

¹⁾*РФА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институт, Мәскеу, Ресей*

²⁾*ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Байкал рифтік зонасы (БРЗ) ауданында S-толқындар жұтылу өрісінің бір текті еместігі мен сейсмикалылықтың сақиналы құрылымдары арасында байланыстығы қаралуда. Литосферада S-толқындар жұтылуы S_n және P_n толқындарда амплитудалардың қатынасы бойынша бағаланған. Улан-Батор (ULN) станциясымен жерсілкінулердің ~400 - 1300 км. қашықтықта алынған шамасы 140 жазбалары өңделген. Байкал көлінің шеткі оңтүстік-батысы мен солтүстік шығысында жоғары жұтылу зоналары айқындалған. Рифтік зонасында орналасқан аралық жұтылудың ең үлкен облысы көлдің орталық бөлшегінде анықталады. 1975 жылдан кейін БРЗ ауданында магнитуданың $M_p=4.2 - 4.7$ табалдырық мәндерімен үш сақиналы құрылымдары қалыптасқан. Бұл құрылымдар Байкал көлінің ауданындағы S-толқындар жоғары және аралық жұтылу зоналарынан өтеді. Сейсмикалылық сақиналарының мөлшерлері және M_p мәндері бойынша сақиналы құрылымдар облыстарында ықтимал қатты жерсілкінулердің магнитудалары бағаланған.

**HETEROGENEITIES OF S WAVE ATTENUATION FIELD AND RING-SHAPED SEISMICITY
STRUCTURES IN THE REGION OF BAIKAL RIFT ZONE**

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 NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

We consider a correlation between heterogeneities of S wave attenuation field and ring-shaped seismicity structures in the region of Baikal rift zone (BRZ). Attenuation in the lithosphere was estimated using amplitude ratios for S_n and P_n waves. About 140 seismograms, obtained by station ULN at distances of ~400 - 1300 km have been processed. We found high attenuation zones at extreme south-west and north-east of Baikal lake. The biggest area of intermediate attenuation, situated within rift zone, is located in the central part of the lake. Since 1975 three ring-shaped seismicity structures were formed in the BRZ (with threshold magnitude values M_t of 4.2 - 4.7). These structures pass through the zones of relatively high attenuation in the area of Baikal lake. Using data of seismicity ring sizes ($L=150 - 310$ km) and M_t values we have estimated magnitudes of possible large earthquakes in the areas of ring-shaped structures ($M_w=6.8 - 7.2$).

УДК 550.34

КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ, ФОРМИРУЮЩИЕСЯ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РАЙОНАХ

¹⁾Копничев Ю.Ф., ²⁾Соколова И.Н.

¹⁾Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

²⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Рассматриваются характеристики сейсмичности перед 53 неглубокими сильными и сильнейшими землетрясениями, произошедшими во внутриконтинентальных районах. Установлено, что перед сильными межплитными землетрясениями формируются кольцевые структуры сейсмичности в диапазоне глубин 0-33 км. Такие структуры не выявлены перед сильными внутриплитными событиями. Показано, что размер кольцевых структур (L), а также пороговые значения магнитуды (Mп) существенно зависят от типа подвижки в очаге. Получены корреляционные зависимости величин L и Mп от магнитуды главных событий для землетрясений с различными механизмами очагов. Обсуждается природа кольцевых структур.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы установлено, что перед многими сильными землетрясениями в течение нескольких десятков лет формируются кольцевые структуры сейсмичности, оконтуривающие области относительного сейсмического затишья [1 - 7]. Такие структуры образуются эпицентрами событий с магнитудами $M \geq M_p$, где M_p – пороговые значения, которые растут с энергией главных землетрясений. Для нескольких зон субдукции получены корреляционные зависимости $IgL(M_w)$ и $M_p(M_w)$, где L – длины больших осей колец сейсмичности, M_w – магнитуды соответствующих им сильных событий [1 - 7]. Использование этих зависимостей позволяет по характеристикам кольцевых структур прогнозировать место и энергию готовящихся сильных землетрясений [5, 7]. Для уточнения таких прогнозов необходимо исследовать, в частности, зависимости параметров кольцевых структур от типа земной коры (континентальная и океаническая), средней скорости ее деформации (межплитные - *interplate*, и внутриплитные - *intraplate* события [8]), а также от механизмов очагов (поскольку хорошо известно, что при прочих равных условиях размеры очаговых зон

существенно различаются для разных типов подвижек [9]). Решению этих задач и посвящена настоящая статья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И СЕЙСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Рассматривались характеристики сейсмичности перед 53 сильными и сильнейшими землетрясениями ($M_w=6.0-8.6$) в разных районах земного шара с корой континентального типа (таблица 1). Отбирались события с $M \geq M_p$ в диапазоне глубин 0 - 33 км, зарегистрированные в интервалах времени $T \leq 50$ лет перед главными событиями. При этом использованы сейсмические каталоги USGS (United States Geological Survey), ISC (International Seismological Centre), а также полученные для различных районов бывшего СССР. Обработаны данные о характеристиках сейсмичности перед 45 межплитными и 8 внутриплитными землетрясениями (таблица 1). При этом были отобраны лишь те события, очаги которых находились достаточно далеко от активных окраин континентов. По этой причине не рассматривались сильные землетрясения из районов Калифорнии, Аляски и некоторых других.

Таблица 1. Параметры кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями в континентальных районах

Дата	φ°	λ°	h, км	M_w	L, км	Mп	T, лет	Механизм	Район
15.08.1950	28.70	96.60	30	8.6	820	6.0	27	сдвига-надвиг	Ассам
16.12.1954	39.30	-118.10	16	7.1	210	5.5	22	сбросо-сдвиг	Невада
18.08.1959	44.70	-110.80	10	7.5	440	4.0	25	сброс	США
08.04.1976	40.31	63.77	33	6.6	-	≥ 4.0	-	взброс	Газли*
28.10.1983	44.06	-113.86	10	7.0	340	4.0	20	сброс	США
22.12.1983	11.87	-13.53	11	6.3	-	≥ 3.0	-	сбросо-сдвиг	Гвинея*
23.08.1985	39.44	75.24	6	7.0	110	4.0	16	взбросо-сдвиг	Тянь-Шань
22.01.1988	-19.83	133.88	5	6.6	-	≥ 3.0	-	взбросо-сдвиг	Австралия*
25.12.1989	60.08	-73.45	5	6.3	-	≥ 3.0	-	взброс	Канада*
05.03.1990	37.04	72.85	18	6.1	170	3.8	17	сброс	Гиндукуш
20.05.1990	5.11	32.18	7	7.2	-	≥ 3.0	-	сбросо-сдвиг	Судан*
20.06.1990	37.01	49.21	18	7.4	420	4.4	17	сдвиг	Иран
29.04.1991	42.43	43.67	7	7.0	150	4.0	23	взброс	Грузия
19.10.1991	30.78	78.77	10	6.8	150	4.5	24	взброс	Гималаи
19.08.1992	42.11	73.61	13	7.2	160	4.1	21	взброс	Тянь-Шань
29.09.1993	18.07	76.45	6	6.3	-	≥ 3.0	-	взброс	Индия*

**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ, ФОРМИРУЮЩИЕСЯ
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РАЙОНАХ**

Дата	ϕ°	λ°	h, км	Mw	L, км	Mп	T, лет	Механизм	Район
27.05.1995	52.60	142.82	11	7.1	240	4.0	22	взбросо-сдвиг	Сахалин
19.11.1996	35.35	78.13	33	6.9	260	4.5	21	сдвиг	Каракорум
04.02.1997	37.66	57.29	10	6.5	140	4.5	27	сдвиг	Копетдаг
27.02.1997	29.94	68.19	24	7.1	85	4.2	24	взбросо-сдвиг	Пакистан
10.05.1997	33.83	59.80	12	7.2	260	4.1	19	сдвиг	Иран
08.11.1997	35.11	87.37	24	7.5	480	5.0	24	сдвиг	Тибет
30.05.1998	37.11	70.11	33	6.6	110	4.5	20	сдвиг	Памир
28.03.1999	30.51	79.40	15	6.6	60	4.0	22	взбросо-сдвиг	Гималаи
17.08.1999	40.75	29.94	17	7.6	280	4.5	24	сдвиг	Турция
25.11.2000	40.25	49.95	26	6.5	120	3.6	17	сброс	Кавказ
06.12.2000	39.57	54.80	30	7.0	75	4.2	23	взбросо-сдвиг	Копетдаг
26.01.2001	24.42	70.23	16	7.6	-	≥ 3.8	-	взбросо-сдвиг	Индия*
14.11.2001	35.95	90.54	10	7.8	700	5.5	28	сдвиг	Тибет
24.10.2002	-1.88	29.00	11	6.2	160	4.2	25	сброс	Танганьика
20.11.2002	35.41	74.52	33	6.3	120	3.7	22	сбросо-сдвиг	Кашмир
27.01.2003	39.50	39.88	10	6.1	60	3.8	25	сдвиг	Турция
01.05.2003	39.01	40.64	10	6.3	120	4.0	28	сдвиг	Турция
21.09.2003	19.92	95.67	10	6.6	150	3.8	28	сдвиг	Мьянма
27.09.2003	50.04	87.81	16	7.3	220	4.1	21	сдвиг	Алтай
22.02.2005	30.75	56.82	14	6.4	90	4.0	28	взброс	Иран
07.04.2005	30.49	83.16	11	6.3	120	4.0	20	сбросо-сдвиг	Тибет
08.10.2005	34.54	73.59	26	7.6	130	4.0	28	сдвиго-надвиг	Гималаи
05.12.2005	-6.22	29.83	22	6.8	150	4.0	32	сбросо-сдвиг	Танганьика
22.02.2006	-21.32	33.58	11	7.0	200	4.3	33	сбросо-сдвиг	Мозамбик
02.08.2007	47.12	141.80	5	6.2	65	4.0	20	взброс	Сахалин
09.01.2008	32.30	85.32	13	6.4	130	3.6	34	сбросо-сдвиг	Синьцзян
20.03.2008	35.49	81.47	10	7.2	240	4.5	34	сбросо-сдвиг	Кунь-Лунь
12.05.2008	31.00	103.32	19	7.9	370	5.0	33	взбросо-сдвиг	Китай
25.08.2008	30.90	83.52	12	6.7	140	4.5	25	сброс	Тибет
27.08.2008	51.61	104.16	16	6.1	190	3.4	17	сбросо-сдвиг	Байкал
05.10.2008	39.53	73.82	27	6.7	55	4.0	32	взбросо-сдвиг	Тянь-Шань
08.03.2010	38.86	39.99	12	6.1	85	3.7	35	сдвиг	Турция
13.04.2010	33.17	96.55	17	6.9	180	3.7	33	сдвиг	Цинхай
20.12.2010	28.41	59.18	12	6.5	130	4.0	20	сдвиг	Иран
24.03.2011	20.69	99.82	8	6.8	190	4.0	30	сдвиг	Мьянма
18.09.2011	27.72	88.06	20	6.9	160	3.7	31	сдвиг	Сикким
14.10.2011	54.11	123.72	15	6.1	-	≥ 3.5	-	сдвиг	Россия*
23.10.2011	38.63	43.49	20	7.2	95	3.7	14	взбросо-сдвиг	Турция

Примечание: * - внутриплитное землетрясение

Исследованные события объединены в три группы по типам механизмов очагов: первая – сбросы и сбросо-сдвиги, вторая – сдвиги, третья – взбросы, взбросо-сдвиги и сдвиго-надвиги. В дальнейшем для краткости эти группы называются сбросы, сдвиги и взбросы, соответственно.

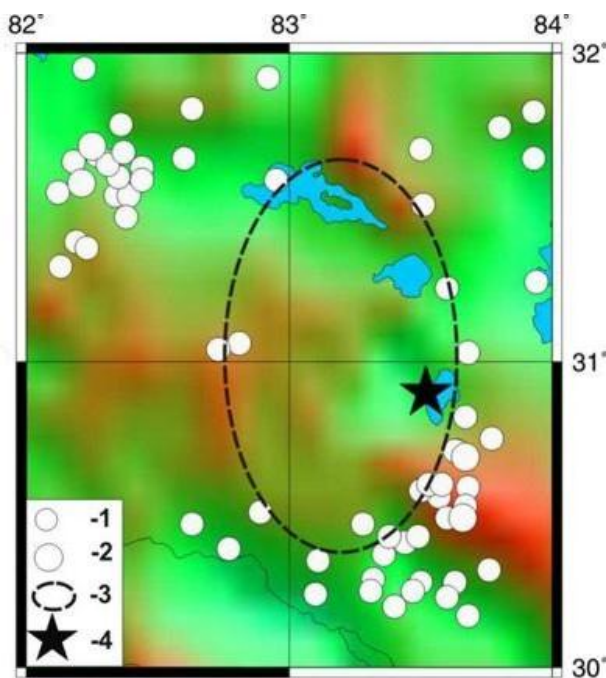
АНАЛИЗ ДАННЫХ

Межплитные (interpolate) землетрясения происходят на границах литосферных плит, в районах, характеризующихся относительно высокими скоростями деформации земной коры [8]. На рисунке 1 показаны характеристики сейсмичности перед землетрясением 25.08.2008 г. в районе Гималаев (Mw=6.7, механизм – почти чистый сброс). В приведенном примере за время Tп=25 лет сформировалась коль-

цевая структура (Mп=4.5), вытянутая в субмеридиональном направлении, с длиной большой оси L=140 км. Максимальная магнитуда Mmax события в районе кольца сейсмичности составляла 6.2. Эпицентр главного землетрясения находился на расстоянии ~10 км от восточного края кольца.

На рисунке 2 приведены данные о сейсмичности перед землетрясением 19.11.1996 г. (Mw=6.9) в районе западного Тибета (механизм – почти чистый сдвиг). Видно, что события с M=4.5-5.5 за 21 год сформировали кольцо с большой осью размером 260 км, вытянутое в субширотном направлении. Эпицентр главного землетрясения находился практически на границе кольцевой структуры

**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ, ФОРМИРУЮЩИЕСЯ
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РАЙОНАХ**

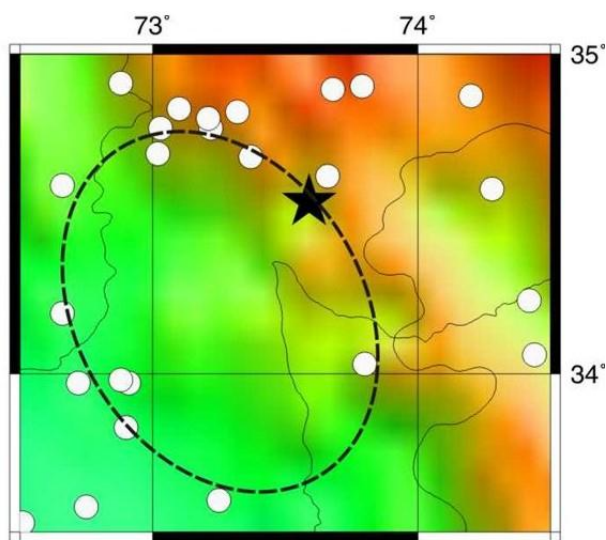


Глубины – 0 - 33 км. Эпицентры землетрясений: 1 - $M=4.0-5.9$; 2 - $M \geq 6.0$; 3 – кольцевая структура; 4 - эпицентр главного события

Рисунок 1. Характеристики сейсмичности перед землетрясением 25.08.2008 г. в районе Гималаев

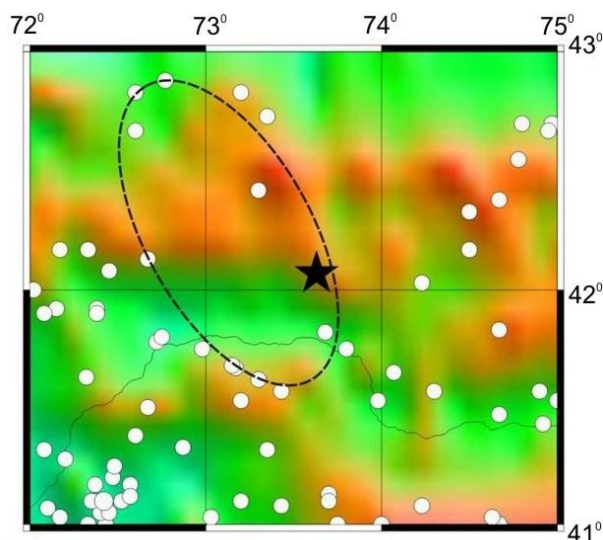
На рисунке 3 показана сейсмичность в районе Центрального Тянь-Шаня. Здесь в период 01.01.1970 - 18.08.1992 г.г. перед Сусамырским землетрясением ($M_w=7.2$, механизм очага - взброс) сформировалось кольцо сейсмичности ($M_p=4.2$, $M_{max}=4.7$) с боль-

шой осью длиной 160 км, вытянутое в направлении на северо-северо-запад. В данном случае эпицентр главного события находился на расстоянии около 10 км от восточного края кольцевой структуры.



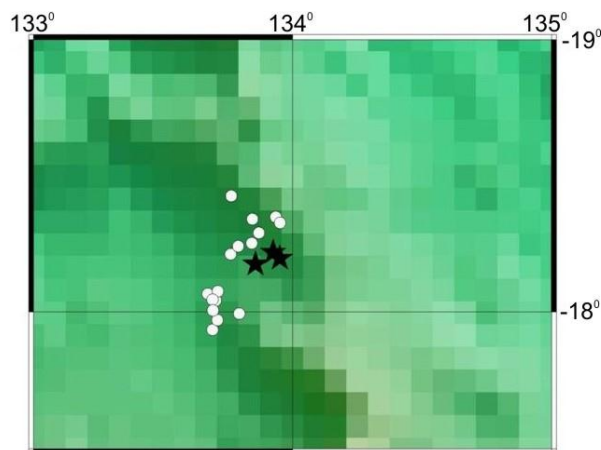
Обозначения – на рисунке 1

Рисунок 2. Характеристики сейсмичности перед землетрясением 19.11.1996 г. в районе западного Тибета



Малый кружок - $M=4.2-5.9$. Остальные обозначения – на рисунке 1

Рисунок 3. Характеристики сейсмичности перед Сусамырским землетрясением 19.08.1992 г. в районе Центрального Тянь-Шаня



Кружок – эпицентр землетрясения с $M \geq 3.5$. Звездочка – эпицентр событий роя

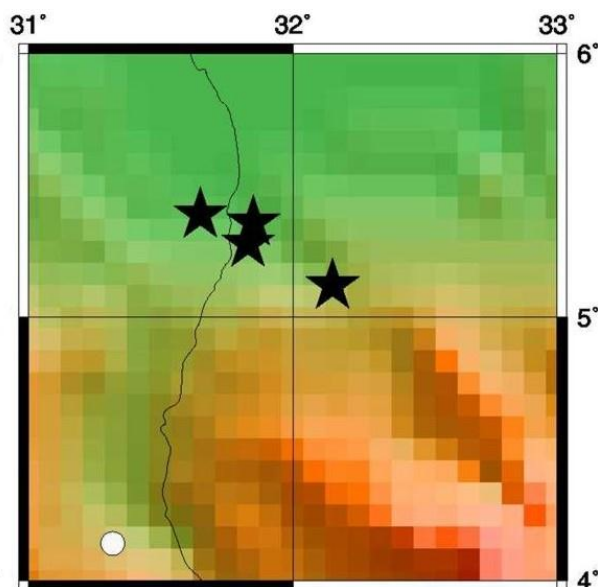
Рисунок 4. Характеристики сейсмичности перед роём землетрясений 22.01.1988 г. в районе центральной Австралии

Кольца сейсмичности выделены также и для многих других рассмотренных межплитных землетрясений (таблица 1). Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев наибольшие магнитуды событий, формирующих кольцевые структуры (M_{max}), значительно ниже магнитуд соответствующих главных землетрясений. Кроме того, эпицентры сильных событий находятся обычно вблизи границ кольцевых структур.

Внутриплитные (intraplate) землетрясения происходят внутри литосферных плит, характеризующихся очень низкими скоростями деформации [8]. Один из примеров таких событий (рисунок 4) – три землетрясения, которые произошли 22.01.1988 г. в

слабосейсмичном районе центральной Австралии ($M_w=6.3-6.6$, механизмы – взбросы). Из рисунка 4 следует, что перед ними в период с 01.01.1964 г. по 21.01.1988 г. были зарегистрированы события с $M=3.5 - 5.2$. Эпицентры этих землетрясений были в основном сгруппированы в узкой полосе длиной ~50 км, но они не сформировали сколько-нибудь заметной кольцевой структуры.

На рисунке 5 представлены характеристики сейсмичности в районе Судана, где с 20 мая 1990 г. в течение двух месяцев произошел роём из четырех сильных землетрясений с $M_w=6.5-7.2$ (механизм очагов – сбросо-сдвиг).



Кружки – эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$. Звездочки – эпицентры событий роя

Рисунок 5. Характеристики сейсмичности перед роём землетрясений 1990 г. в районе Судана

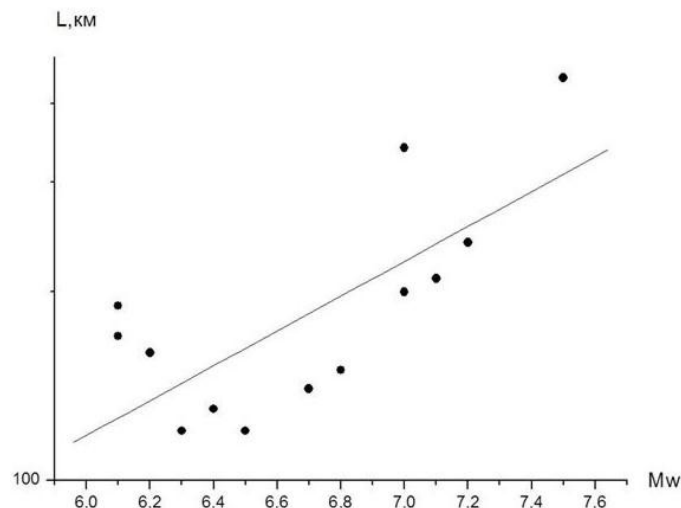


Рисунок 6. Зависимость параметров lgL от Mw для сбросов

Из рисунка 5 видно, что с 01.01.1964 г. по 19.05.1990 г. имели место всего три события с магнитудой более 3.0 ($M=4.1 - 5.1$), поэтому здесь также не могло сформироваться кольцо сейсмичности. Сходные результаты получены и для остальных рассмотренных сильных внутриплитных землетрясений (таблица 1). Таким образом, перед внутриплитными

событиями, в отличие от межплитных, не формируются кольцевые структуры сейсмичности.

Зависимости параметров кольцевых структур от механизмов главных событий. На рисунках 6 - 8 показаны зависимости размеров кольцевых структур от магнитуды для разных типов подвижек в очагах главных событий – сбросов (рисунок 6), сдвигов (рисунок 7), взбросов (рисунок 8).

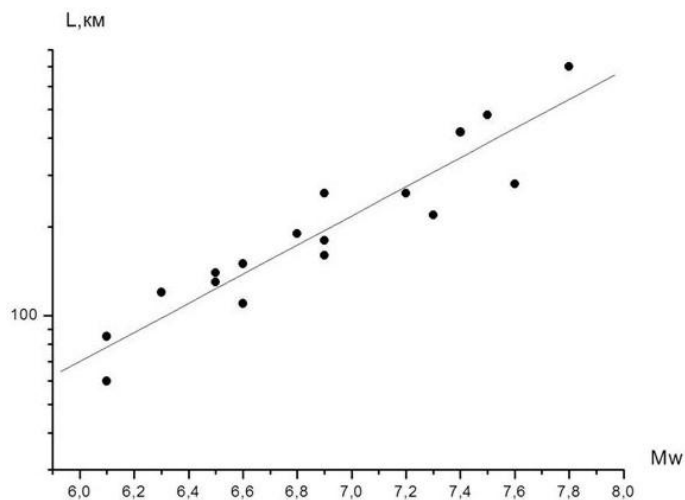


Рисунок 7. Зависимость параметров lgL от Mw для сдвигов

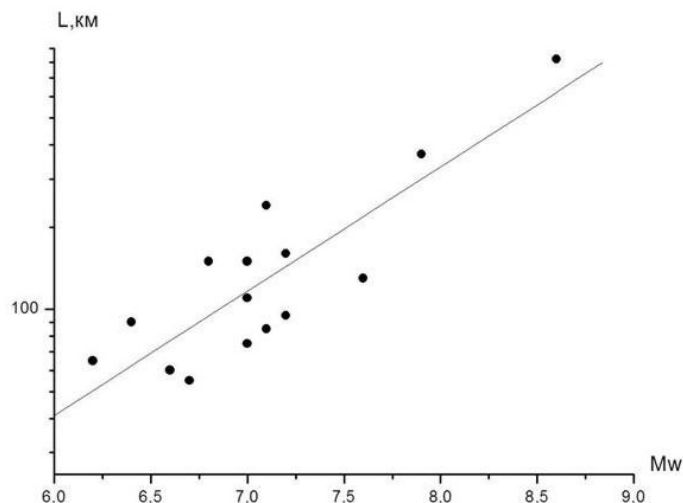


Рисунок 8. Зависимость параметров lgL от M_w для взбросов

Из этих рисунков видно, что во всех трех случаях наблюдаются линейные зависимости $lgL(M_w)$. При этом уравнения линейной регрессии описываются формулами:

$$lgL = 0.40 + 0.28M_w, r=0.73 \quad (1)$$

для сбросов,

$$lgL = -1.12 + 0.49M_w, r=0.94 \quad (2)$$

для сдвигов и

$$lgL = -1.11 + 0.45M_w, r=0.85 \quad (3)$$

для взбросов (r – коэффициент корреляции). Из зависимостей (1 - 3) следует, что средние размеры колец сейсмичности существенно различаются для трех рассматриваемых групп событий. Для одних и

тех же величин M_w параметры L для взбросов значительно (в 1.5 - 3 раза в диапазоне $M_w=6.0 - 7.0$) ниже, чем для сдвигов и сбросов. При $M_w \sim 6.0$ размеры колец максимальны для сбросов, однако они увеличиваются с ростом магнитуды медленнее, чем для других типов подвижек, так что при $M_w > 7.0$ становятся меньше, чем для сдвигов. Из рисунков 6-8 также следует, что для всех механизмов очагов величины L значительно ниже, чем для района Суматры [2] (в 2.5 - 4 раза в диапазоне магнитуд $M_w=7.0 - 8.0$).

На рисунках 9 - 11 показаны зависимости пороговых значений магнитуды от величин M_w .

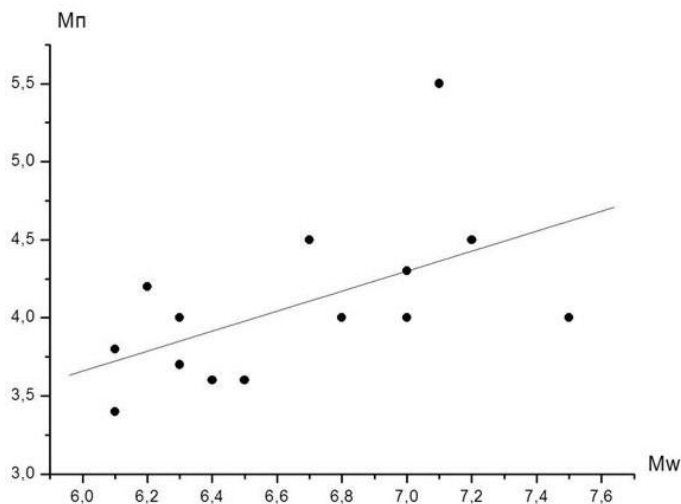


Рисунок 9. Зависимость параметров M_p от M_w для сбросов

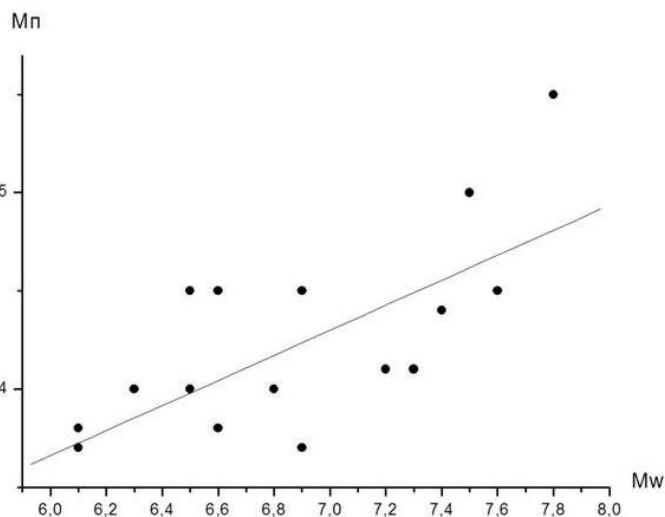


Рисунок 10. Зависимость параметров $Mп$ от Mw для сдвигов

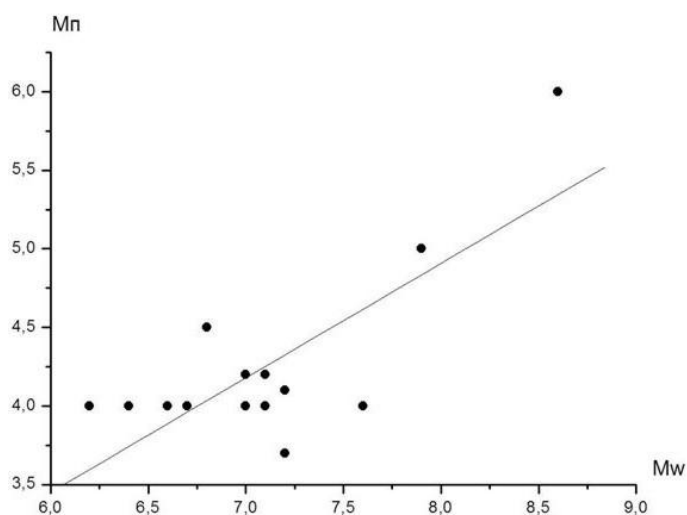


Рисунок 11. Зависимость параметров $Mп$ от Mw для взбросов

Параметры $Mп$ растут с увеличением Mw , корреляционные зависимости описываются следующими формулами:

$$Mп = -0.19 + 0.64Mw, r=0.55, \quad (4)$$

$$Mп = -0.17 + 0.64Mw, r=0.67, \quad (5)$$

$$Mп = -0.92 + 0.73Mw, r=0.77 \quad (6)$$

для сбросов, сдвигов и взбросов, соответственно.

Из рисунков 9 – 11 видно, что, в отличие от размеров колец, зависимости $Mп$ почти одинаковы для всех типов подвижек. Кроме того, в диапазоне $Mw \sim 7.0 - 8.0$ они достаточно близки к аналогичным зависимостям, полученным для зоны субдукции в районе Суматры [2]. Следует заметить, что коэффи-

циенты корреляции в зависимостях (4 - 6) существенно ниже, чем в выражениях (1 - 3).

Рисунки 12 - 14 иллюстрируют зависимости времени формирования кольцевых структур от магнитуды. Из них следует, что в рассматриваемом диапазоне Mw величины $Tп$ для всех типов подвижек варьируются в диапазоне 14 - 35 лет и практически не зависят от магнитуды главного события. Средние значения T равны 24 ± 6 ; 25 ± 5 ; 24 ± 5 лет, соответственно для сбросов, сдвигов и взбросов. Таким образом, судя по полученным данным, длительность формирования колец сейсмичности не зависит и от механизма готовящегося землетрясения.

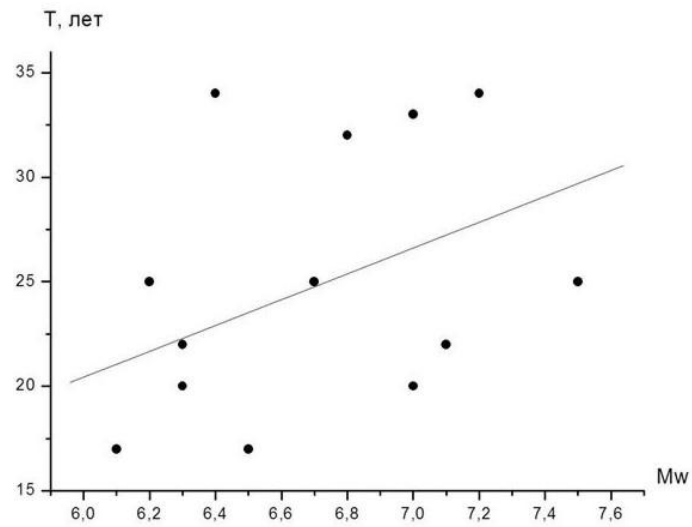


Рисунок 12. Зависимость параметров T_n от M_w для сбросов

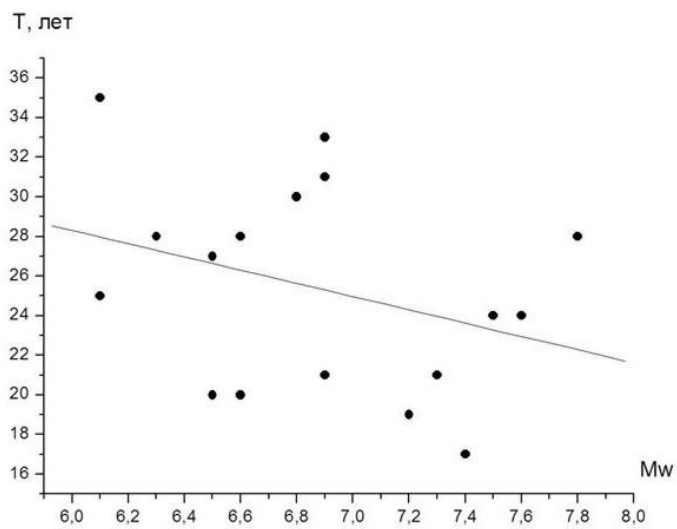


Рисунок 13. Зависимость параметров T_n от M_w для сдвигов

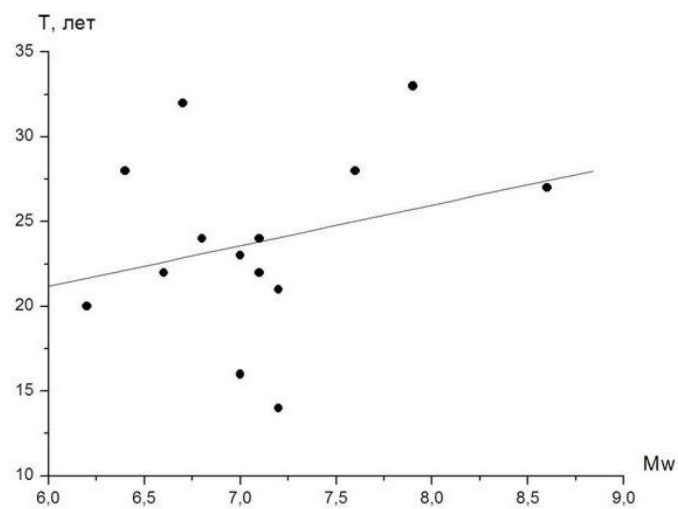


Рисунок 14. Зависимость параметров T_n от M_w для взбросов

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о том, что во внутриконтинентальных районах, так же, как и в зонах субдукции, перед сильными межплитными землетрясениями формируются неглубокие кольцевые структуры сейсмичности. В то же время, по данным авторов, глубокие кольца сейсмичности (на глубинах 34 - 70 км), в отличие от активных окраин континентов [1 - 7], проявляются здесь достаточно редко. Мелкие кольцевые структуры в континентальных районах не выделяются перед сильными внутриплитными землетрясениями. Следует отметить, что аналогичный эффект был установлен ранее для двух внутриплитных землетрясений ($M_w=7.9$ и 7.8), произошедших в 1987 и 1988 гг. в океанической плите к югу от Аляски [6].

В [10] было показано, что в очаговых зонах сильных межплитных землетрясений сразу после таких событий наблюдается высокое поглощение короткопериодных S-волн, что свидетельствует о достаточно большом содержании флюидов в нижней коре и верхах мантии. Формирование кольцевых структур связывается с эффектом самоорганизации геологических систем, обеспечивающим подъем глубинных флюидов, что, в конечном счете, ведет к уменьшению потенциальной энергии Земли [1 - 7]. В связи с этим отсутствие колец сейсмичности перед сильными внутриплитными землетрясениями можно объяснить низким содержанием свободных флюидов в таких районах.

Можно полагать, что формирование колец сейсмичности свидетельствует об образовании слоя двухфазной среды со связанной сетью флюидов, которая обеспечивает концентрацию напряжений на его кровле [1 - 7, 11]. Как известно, величина дополнительных напряжений пропорциональна мощности двухфазного слоя [12]. В [1, 2, 4 - 7] показано, что в зонах субдукции обычно формируются кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0 - 33 и 34 - 70 км. При этом эпицентры сильных землетрясений, как правило, находятся вблизи областей пересечения или наибольшего сближения кольцевых структур, где достигается максимальная мощность двухфазного слоя со связанной сетью флюидов. Это позволяет объяснить известный парадокс, сформулированный Дж. Райсом [13]: горизонтальные напряжения малы на границах плит, движущихся с большими скоростями, где и происходят сильнейшие землетрясения, и велики во внутриконтинентальных районах, где сильные землетрясения происходят относительно редко. Большие дополнительные напряжения на кровле субвертикальной зоны двухфазного материала обеспечивают триггерный эффект, приводящий к инициированию сильного землетрясения при сравнительно низком уровне общих горизонтальных напряжений.

Сопоставление с данными, полученными ранее для районов Суматры, Южной Америки, северо-вос-

точной Японии, Алеут и Аляски [2,4 - 7] показывает, что размеры колец сейсмичности для данной M_w во внутриконтинентальных районах в несколько раз больше, чем в зонах субдукции. Для объяснения этого эффекта можно предположить, что энергия готовящегося сильного землетрясения пропорциональна потенциальной энергии, высвобождающейся при подъеме глубинных флюидов. В этом случае имеет место значительно более низкое среднее содержание флюидов в литосфере внутриконтинентальных районов по сравнению с зонами субдукции, о чем можно судить по характеристикам поля поглощения [14] и оно компенсируется увеличением размеров колец сейсмичности, на границах которых и происходит подъем флюидов перед сильными землетрясениями [3].

Полученные в последние годы данные свидетельствуют о том, что подъем флюидов в литосфере сейсмоактивных районов происходит в значительной степени в результате землетрясений [10, 15]. Это может объяснить близкие величины пороговых значений магнитуд (для данной M_w) в зонах субдукции и внутриконтинентальных районах [2, 4, 5 - 7].

Таким образом, различие размеров колец сейсмичности в зонах субдукции и внутри континентов, а также их отсутствие для внутриплитных событий коррелируется с содержанием флюидов в литосфере различных районов. Отметим, что различие доли свободных флюидов, вероятно, позволяет объяснить и разные периоды повторяемости сильных землетрясений в этих районах. Как известно, для магнитуды $M_w\sim 8$ величины T_p в зонах субдукции составляют в среднем около 100 тыс. лет, в то время как в районах Алтая и Монголии $\sim 2-3$ тысячи лет [16]. В то же время для гораздо более слабых внутриплитных событий с $M_w\sim 6-7$ в слабосейсмичных районах Австралии и Индии, где кольцевые структуры не формируются, по палеосейсмическим данным величины T_p оцениваются в несколько десятков тысяч лет [8]. Возможно, что данный эффект связан с резким различием скорости вертикальной миграции флюидов в различных тектонических структурах до начала этапа формирования колец сейсмичности такая миграция происходит по граням зерен под действием сдвиговых напряжений относительно медленно [17]). В то же время сам этот этап, скорее всего, начинается после достижения определенной пороговой концентрации флюидов в нижней коре и верхах мантии в окрестностях будущего очага землетрясения.

Можно предполагать, что существенное различие средних размеров колец сейсмичности при прочих равных условиях для разных механизмов очагов также обусловлено вариациями содержания флюидов в литосфере. Дело в том, что для сбросов (и в меньшей степени для сдвигов, для которых формируются кулисообразные структуры [18]), в условиях близгоризонтального растяжения имеет место наибольшая проницаемость горных пород. Это должно приводить к большей скорости миграции флюидов и

к гораздо более быстрому “осушению” литосферы. Существуют следующие экспериментальные данные, подтверждающие данный вывод. Во-первых, в работе [14] показано, что в районе Байкальской рифтовой зоны, одной из крупнейших на континентах, наблюдается достаточно слабое поглощение S-волн в литосфере по сравнению с теми районами Центральной Азии, где доминирует напряжение сжатия, например, Тянь-Шанем. Во-вторых, по мировым данным, после сильных землетрясений подъем флюидов из верхов мантии действительно происходит гораздо интенсивнее для сбросов и сдвигов по сравнению со взбросами и надвигами [10].

Пока неясно, с чем связана практическая независимость времени формирования кольцевых структур от магнитуды и механизма очага (отметим, что для зоны субдукции в районе северо-восточной Японии средняя величина T_p для мелких колец в диапазоне магнитуд $M_w=7.0 - 9.0$ составляет 26 ± 6 лет [7], что достаточно близко к полученным нами оценкам для внутриконтинентальных районов). Возможно, этот эффект объясняется практическим постоянством средней скорости подъема флюидов на этапе формирования кольцевых структур (в отличие от этапа миграции флюидов по граням зерен [17]).

Полученные результаты дают возможность существенно уточнять прогноз магнитуд готовящихся сильных землетрясений во внутриконтинентальных районах, хотя бы потому, что механизмы сильных землетрясений достаточно устойчивы в определенных тектонических структурах. Так, например, хо-

рошо известно, что в рифтовых зонах доминируют сбросы и сбросо-сдвиги [19, 20], а в районе Тянь-Шаня – взбросы и взбросо-сдвиги [20]. При этом, судя по коэффициентам корреляции для зависимостей (1) – (6), наиболее надежные оценки величин M_w могут быть получены на основании оценок размеров кольцевых структур. Исключение составляет группа взбросов, для которой можно также использовать параметр M_p (для нее получен относительно высокий коэффициент корреляции). Далее, исходя из полученных средних величин T_p , можно приблизительно (с точностью до 5-10 лет) оценивать возможные времена реализации сильных сейсмических событий. Это имеет особое значение для внутриконтинентальных землетрясений, периоды повторяемости которых нередко определяются с точностью несколько сотен лет [16].

Кольца сейсмичности в континентальных районах имеют относительно большие размеры, поэтому для уточнения положения будущих очаговых зон необходимо привлекать дополнительные данные (палеосейсмические, геофизические и т. д.). Кроме того, для более точной оценки времени готовящихся сильных землетрясений в районах кольцевых структур целесообразно устанавливать дополнительные сейсмические станции, по записям которых можно выделять относительно слабые форшоки, а также, в частности, исследовать временные вариации поля поглощения S-волн, отражающие процессы миграции глубинных флюидов [10].

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. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин в регионе Южной Америки / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2010. – Вып. 1. – С. 100 - 110.
5. 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.
6. 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.
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. 4. – С. 121 - 130.
8. Gangopadhyay, A. Symptomatic features of intraplate earthquakes / A. Gangopadhyay, P. Talwani // Seismol. Res. Lett. 2003. V. 74. N 6. P. 863 - 883.
9. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М.: Наука. 1985. – С. 176.
10. 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.
11. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе очага Чилийского землетрясения 27.02.2010 г. ($M_w=8.8$) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования, 2011. – Вып. 3. – С. 22 - 32.

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. Sibson, R. Geology of the crustal earthquake source // International handbook of earthquake and engineering seismology / R. Sibson // Academic Press. An imprint of Elsevier Science, 2002. – Part 1. – P. 455 - 473.
14. Щукин, Ю.К. Глубинное строение слабосейсмичных регионов СССР. / Ю.К.Щукин, В.З.Рябой [и др.] // М: Наука, 1987.
15. Yamazaki T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab / T. Yamazaki, T. Seno // J. Geophys. Res. 2003. – V. 108, N B4. doi: 10.1029/2002JB001918.
16. Рогожин, Е.А. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене / Е.А. Рогожин, С.Г. Платонова // М.: ОИФЗ РАН, 2002. – 130 с.
17. Hier-Majumder, S. Role of dynamic grain boundary wetting in fluid circulation beneath volcanic arcs / S. Hier-Majumder, D. Kohlstedt // Geophys. Res. Lett., 2006. – V. 33. L08305.
18. Аптикаева, О.И. Неоднородности литосферы и астеносферы в очаговой зоне Рачинского землетрясения 1991 года / О.И. Аптикаева, С.С. Арефьев, С.И. Кветинский, Ю.Ф. Копничев, В.Н. Мишаткин // Докл. РАН, 1995. – Т. 344, № 4. – С. 533 - 538.
19. Грачев, А.Ф. Рифтовые зоны Земли. Л.: Недра, 1977. – С. 247.
20. Tapponnier, P. Active faulting and cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia and Baikal regions / P. Tapponnier, P. Molnar // J. Geophys. Res., 1979. – V. 84. – P. 3425 - 3459.

КОНТИНЕНТАЛЬДЫ АУДАНДАРДАҒЫ ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕР АЛДЫНДА ҚАЛЫПТАСАТЫН СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ АЙНАЛМАЛЫ ҚҰРЫЛЫМЫ

¹⁾Копничев Ю.Ф., ²⁾Соколова И.Н.

¹⁾*РФА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей*
²⁾*ҚР ҰАО РМК Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Ішкі континентальды аудандарда болған 53 терең емес қатты және өте қатты жерсілкінулер алдындағы сейсмикалықтың сипаттамалары қаралуда. Қатты плаитааралық жерсілкінулер алдында 0 - 33 км тереңдік диапазонында сейсмикалықтың айналмалы құрылымдары қалыптасатыны анықталды. Мұндай құрылымдар қатты плаита ішіндегі оқиғалар алдында анықталмаған. Айналмалы құрылымдардың көлемі (L), сонымен қатар магнитуданың бастапқы мағыналары (M_p) ошақтағы қозғалыстың түріне недәуір байланысты екендігі көрсетілген. Ошақтың әр түрлі механизмді жерсілкінулер үшін негізгі оқиғалардың магнитудаларынан L және M_p өлшемдерінің корреляциялық тәуелділігі алынды. Айналмалы құрылымдардың табиғатын талқылау жүргізілуде.

RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES, BEING FORMED PRIOR TO LARGE EARTHQUAKES WITHIN INTRACONTINENTAL REGIONS

¹⁾Yu.F. Kopnichev, ²⁾I.N. Sokolova

¹⁾*Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
²⁾*Institute of Geophysical Research, NNC RK, Almaty, Kazakhstan*

We have been studying seismicity characteristics prior to 53 shallow large and great earthquakes with different mechanisms, which occurred within intracontinental regions. It was established, that ring-shaped seismicity structures within depth range of 0-33 km were formed prior to large interplate earthquakes. Such the structures were not revealed prior to large intraplate earthquakes. It was shown, that ring structure sizes (L) and also threshold magnitude values (M_t) essentially depend on the earthquake mechanism. We have obtained correlation dependences for L and M_t values on magnitude of the major events. We discuss a nature of ring-shaped structures.

УДК 550.344 + 550.34

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В РАЙОНЕ ГИНДУКУША И ИХ СВЯЗЬ С ГЛУБОКОФОКУСНОЙ СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

¹⁾Копничев Ю.Ф., ²⁾Соколова И.Н.

¹⁾ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

²⁾ *Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Исследуются пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в районе Гиндукуша по изменениям отношения максимальных амплитуд в волнах S и P (параметр S/P), зарегистрированных киргызскими станциями Ала-Арча (ААК) и Эркинсай (ЕКС2) в 1993 - 2012 гг. на эпицентральных расстояниях ~650 - 800 км. Показано, что для гипоцентров на глубинах 231 - 270 и 211 - 230 км наблюдается отрицательная корреляция параметров S/P. Для глубин 211 - 230 км и 191 - 210 км имеет место корреляция параметров S/P, начиная с 2002 г., после сильнейшего глубоководного землетрясения 03.03.2002 г. ($M=7.4$). Предполагается, что обнаруженные эффекты связаны с процессами подъема глубинных флюидов, а также гидратации и дегидратации мантийных пород.

Изучению природы гиндукушской зоны глубоководной сейсмичности посвящено значительное количество публикаций [1 - 3 и др.]. Построены разрезы полей скоростей P- и S-волн до глубин ~250 км, выявлена их существенная горизонтальная неоднородность [1]. Исследовано пространственное распределение очагов глубоководных землетрясений [1 - 3], установлена связь сильнейших глубоководных и сильных коровых событий в обширном регионе Центральной и Южной Азии [4]. Вместе с тем следует признать, что вопрос о природе зоны глубоководной сейсмичности далек от окончательного решения. Для его решения необходимо привлекать дополнительные сейсмические и геофизические данные. В данной статье с этой целью рассматриваются характеристики поля поглощения S-волн в зоне глубоководных землетрясений и проводится их сопоставление с элементами сейсмичности.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Глубоководная сейсмичность в районе Гиндукуша сконцентрирована в основном в диапазоне глубин ~70 - 300 км [3]. В таблице 1 представлены данные о землетрясениях с $M \geq 7.0$, произошедших с начала XX-го века.

Из таблицы 1 следует, что за 110 лет в районе Гиндукуша произошло 13 таких событий. При этом с 1965 по 2002 гг. они происходили регулярно с периодичностью 9 лет. После 2002 г. эта периодичность нарушилась; в связи с чем есть большие основания предполагать, что в ближайшие годы здесь снова может реализоваться землетрясение с $M \geq 7.0$. На рисунке 1 показано распределение по глубине количества глубоководных землетрясений в районе Гиндукуша начиная с 1973 г., когда глубины определялись с относительно высокой точностью.

Таблица 1. Параметры землетрясений с $M \geq 7.0$ с 1900 г. в районе Гиндукуша

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

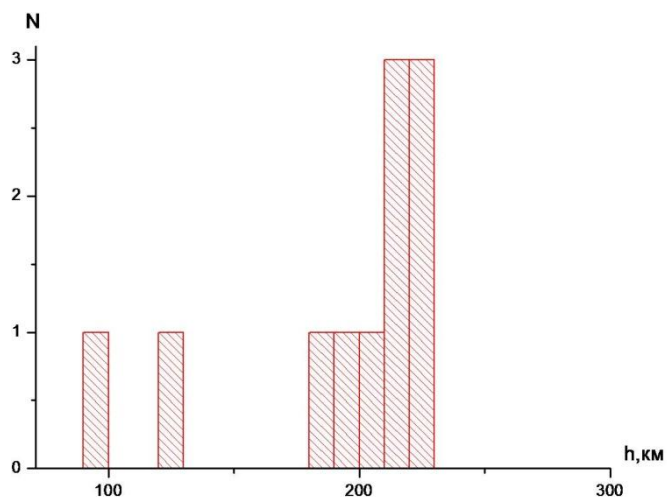
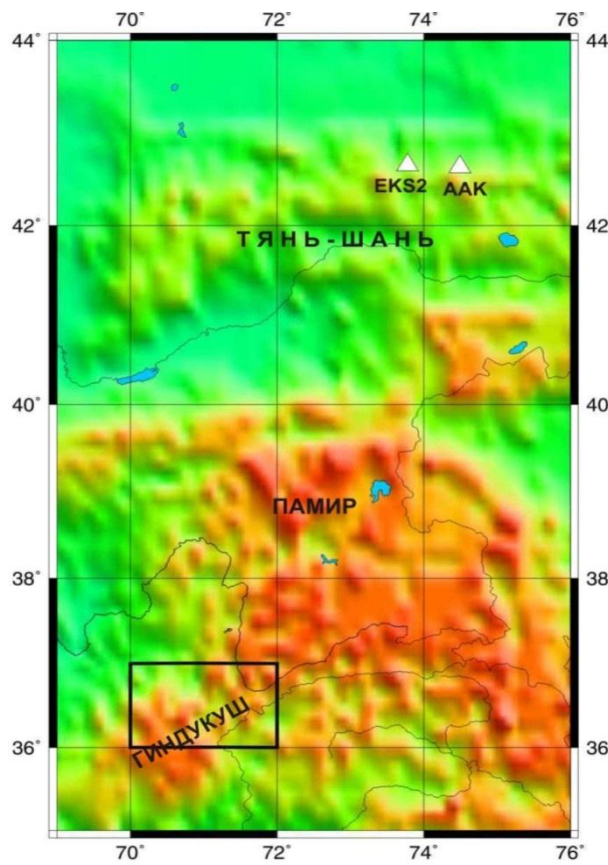


Рисунок 1. Распределение по глубине количества сильных землетрясений ($M \geq 6.5$) в районе Гиндукуша

Из рисунка 1 видно, что 9 из 11 событий с $M \geq 6.5$ произошли на глубинах 181 - 230 км; при этом гипоцентры всех четырех землетрясений с $M \geq 7.0$ попали в узкий диапазон $h=211 - 230$ км (таблица 1). Такое распределение событий во внутриконтинентальном районе существенно отличается от распределения в зонах субдукции, где количество землетрясений, как правило, монотонно убывает с глубиной до $h \sim 300$ км [5].

СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Проведен анализ записей гиндукушских землетрясений в диапазоне глубин 151 - 270 км, полученных станциями Ала-Арча (ААК) и Эркинсай (ЕКС2) в 1993 - 2012 гг. (рисунок 2).



Прямоугольник – очаговая область; треугольник – сейсмическая станция

Рисунок 2. Район исследований

Магнитуда землетрясений находились в диапазоне 4.0 - 6.0, эпицентральные расстояния варьировались от 650 до 800 км. В общей сложности обработано более 700 записей. Глубины в рассматриваемом диапазоне были разбиты на четыре слоя: 151 - 190, 191 - 210, 211 - 230 и 231 - 270 км. Для трех верхних слоев гипоцентры распределялись по глубине достаточно равномерно, в то время как для нижнего слоя - более 80% событий происходили на глубинах 231 - 250 км.

МЕТОДИКА

Для учета зависимости добротности среды от частоты колебаний проводилась узкополосная фильтрация записей (использовался фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы на уровне 0.7 от максимума [6]). Измерялись отношения максимальных амплитуд в Р- и S-волнах (параметр $\lg(AS/AP)$, который для краткости далее обозначен как S/P). Очевидно, что увеличение параметра S/P соответствует уменьшению эффективного поглощения короткопериодных поперечных волн и наоборот [7]. Следует заметить, что на уровень параметра S/P существенно влияют диаграммы направленности излучения S и Р-волн. а также неоднородности поля поглощения в области регистрирующих станций [7].

Для учета роли первого фактора проведено осреднение параметров S/P в каждом диапазоне глубин. Обычно осреднялись данные за год, реже – за два или три года (в зависимости от количества сейсмограмм).

Роль второго фактора состоит в том, что при использовании записей одной и той же станции для гипоцентров с разными глубинами лучи могут проходить разные отрезки пути в некоторой неоднородности высокого поглощения. Согласно ранее полученным данным, зоны наиболее сильного поглощения S-волн в районе Центрального Тянь-Шаня, как правило, находятся в нижней коре, на глубинах ~30 - 50 км [8]. Здесь же располагаются и области самой высокой проводимости по данным МТЗ [9]. В обоих случаях эти эффекты связываются с присутствием заметной доли свободных флюидов. Для оценки роли второго фактора рассмотрим смещение лучей на границе М от источников на разных глубинах. Примем для определенности простейшую двухслойную модель среды с толщиной коры $h_k=50$ км и скоростями S-волн в коре и верхах мантии соответственно 3.5 и 4.6 км/с. В таблице 2 указаны величины сноса лучей в коре для очагов, расположенных на разных глубинах.

Таблица 2. Оценка смещения лучей на границе М от гиндукушских землетрясений с разными глубинами очагов

h, км	ik°	rk, км	lk, км
170	48.3	56.1	75.0
200	47.7	54.9	74.3
220	47.3	54.2	73.7
250	46.5	52.6	72.6

Примечание. Здесь ik – угол луча с вертикалью (в коре), rk - снос луча в коре, lk – длина трассы луча в коре

Из таблицы 2 следует, что для эпицентров, расположенных в середине самого верхнего и самого нижнего слоев, расхождение лучей на границе М (Δrk) составляет ~3.5 км. В то же время радиус зоны Френеля $R_f = \sqrt{lk\lambda}$ (lk – длина отрезка трассы, проходящей лучем в коре, λ - длина волны) составляет ~14 км. Отсюда следует, что величина отношения $rk/R_f \ll 1$, поэтому можно считать, что неоднородности поля поглощения в нижней коре не приводят к существенным различиям параметра S/P для разных глубин очагов (при прочих равных условиях).

АНАЛИЗ ДАННЫХ

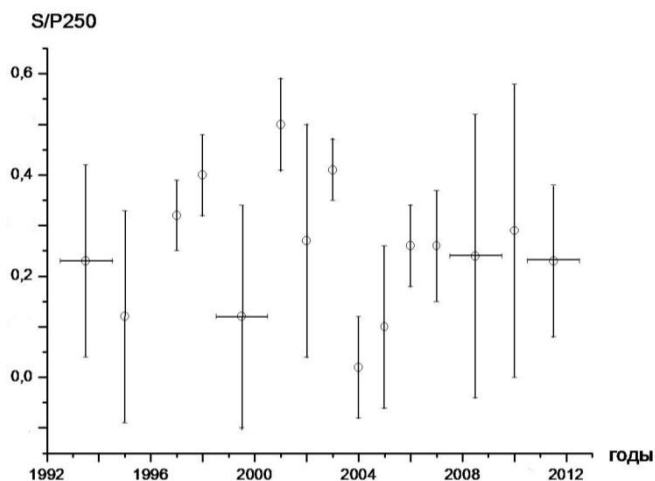
На рисунке 3 показана зависимость параметра S/P от времени для диапазона глубин 231 - 270 км по данным станции ААК (для краткости обозначим его как S/P250, здесь и ниже индекс соответствует средней глубине диапазона).

Доверительные интервалы для средних значений на уровне 0.7 варьируются от 0.07 до 0.29. Видно,

что средние величины S/P250 изменяются в диапазоне от 0.02 (в 2004 г.) до 0.50 (в 2001 г.). Наблюдается рост величин S/P250 с 1993 до 2001 г., далее - до 2012 г. - они в целом падают. Важно отметить, что максимальное значение S/P250 наблюдалось непосредственно перед сильнейшим глубоководным землетрясением 03.03.2002 г. (M=7.4). После этого события в течение 4 лет величина S/P250 резко падает (до 0.02 - 0.10). Среднее значение S/P250 за 1993 - 2012 гг. равно 0.25 ± 0.12 . Интересно, что в 2001 - 2006 гг. имели место наибольшие вариации параметра на фоне общего его падения.

На рисунке 4 показаны средние величины S/P250 до и после сильного землетрясения 09.08.1993 г. (M=7.0). В данном случае осреднение проведено по небольшому количеству данных.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН
 В РАЙОНЕ ГИНДУКУША И ИХ СВЯЗЬ С ГЛУБОКОФОКУСНОЙ СЕЙСМИЧНОСТЬЮ



Вертикальный отрезок - доверительный интервал на уровне 0.7.
 Горизонтальная риска - интервал осреднения данных (в остальных случаях он равен 1 году)

Рисунок 3. Временные вариации параметра S/P250 (по данным станции ААК)

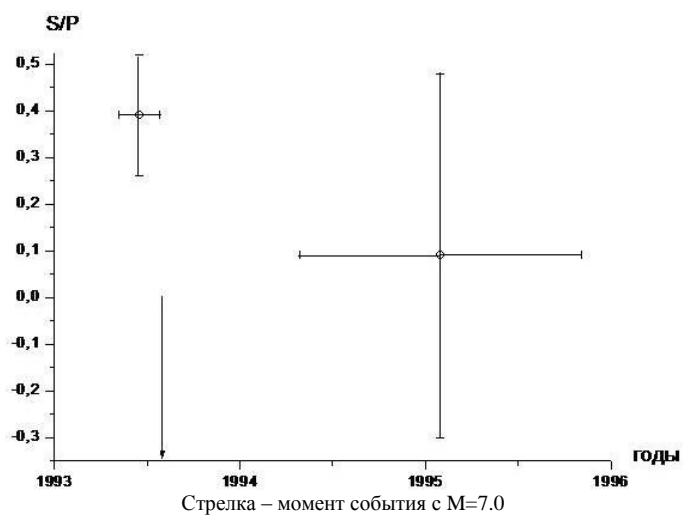


Рисунок 4. Вариации параметра S/P250 до и после землетрясения 09.08.1993 г. (по данным станции ААК)

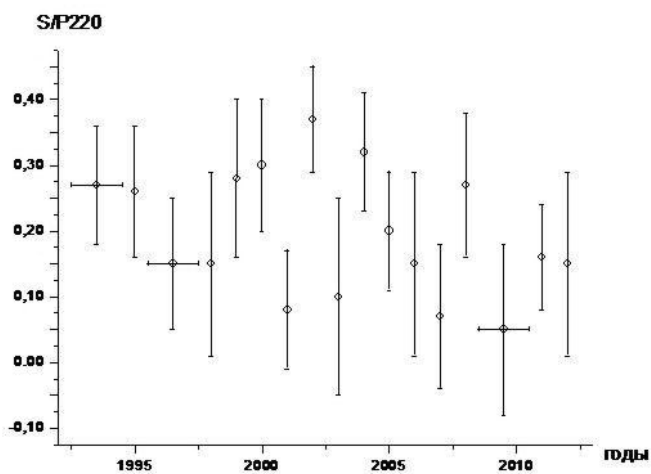
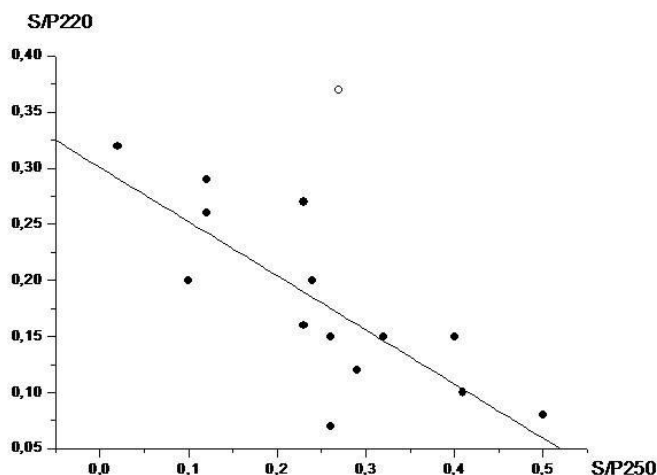


Рисунок 5. Временные вариации параметра S/P220 (по данным станции ААК)



Незалитый значок – данные за 2002 г. Прямая – линия регрессии (за исключением данных за 2002 г.)

Рисунок 6. Корреляционная зависимость параметров S/P250 и S/P220 (по данным станции ААК)

Из рисунка 4 следует, что средняя величина S/P250 также значительно (на 0.30) снизилась в 1994 - 1995 гг. по сравнению со значением до события с $M=7.0$. Рисунок 5 иллюстрирует зависимость параметра S/P220 от времени для диапазона глубин 211 - 230 км. В данном случае разброс средних значений S/P220 значительно меньше, чем для предыдущего диапазона глубин (от 0.07 до 0.37). В целом наблюдается небольшой рост величин S/P220 с 1993 по 2000 гг. и дальнейшее их снижение к 2012 г. Средняя величина S/P220 равна 0.20 ± 0.10 . Как и для диапазона глубин 231 - 270 км, вариации параметра резко увеличиваются, начиная с 2001 г. В 2001 г. имело место значительное уменьшение среднего значения S/P220, тогда как в 2002 г. наблюдался резкий рост величины этого параметра, который начался еще до сильнейшего землетрясения 03.03.2002 г. (в среднем за период (01 - 02)2002 г. $S/P220 = 0.39 \pm 0.22$).

На рисунке 6 показан характер зависимости параметров S/P250 и S/P220. Существенно, что с 1993 по 2012 гг. имела место отрицательная корреляция этих величин (коэффициент корреляции равен 0.80). При этом значение S/P за 2002 г. резко отклоняется вверх ($>3\sigma$) от корреляционной зависимости.

На рисунке 7 показана зависимость параметра S/P220 от времени по данным ст. ЕКС2, полученным в 1996 - 2011 гг. Из графика следует, что в данном случае вариации параметра S/P220 даже больше, чем для станции ААК. несмотря на меньший интервал времени (от 0.23 до 0.65). Максимальное значение параметра поглощения получено в 2002 г., при этом резкий его рост, как и по данным станции ААК. начался с января 2002 г., еще до землетрясения с $M=7.4$. В среднем величина S/P220 равна 0.43 ± 0.11 , что значительно выше, чем по данным станции ААК.

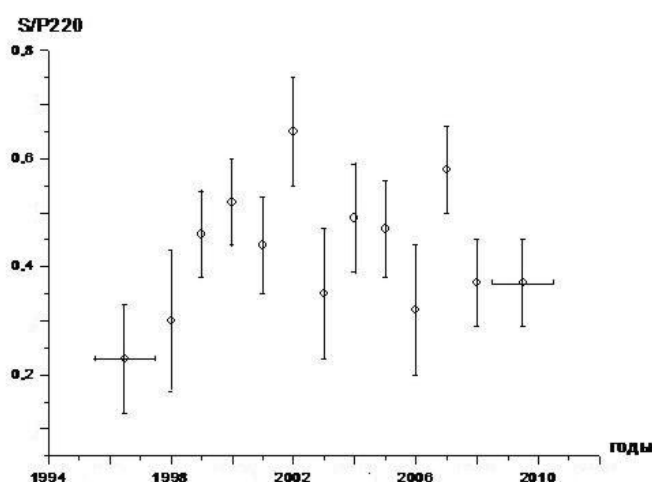


Рисунок 7. Временные вариации параметра S/P220 (по данным станции ЕКС2)

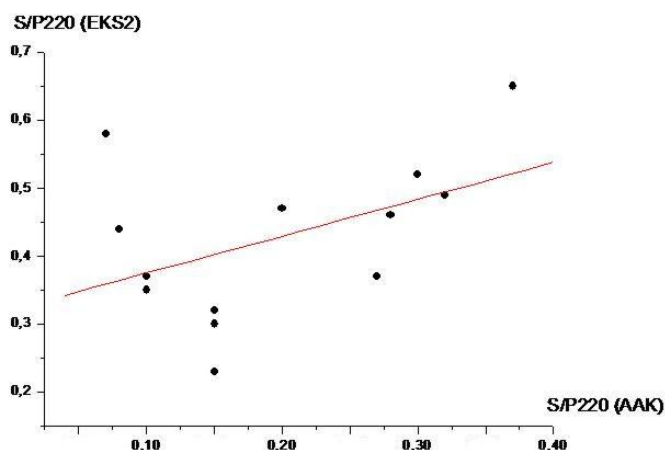


Рисунок 8. Корреляционная зависимость параметров S/P220 (по данным станций ААК и ЕКС2)

Из рисунка 8 видно, что в промежутке с 1996 по 2011 гг. в целом наблюдается корреляция этих величин по данным станций ААК и ЕКС2. Исключение составляют только значения за 2007 г. На рисунке 9 представлена зависимость от времени параметра S/P200 (по данным станции ААК). В данном случае средние значения параметра варьируются значительно меньше (от 0.20 до 0.49), в среднем $S/P200=0.36\pm 0.07$. В целом существует тенденция к небольшому падению значений S/P200 с течением времени; вариации параметра значительно возрастают, начиная с 2003 г. Следует отметить, что с 2002 по 2012 гг. наблюдается корреляция величин S/P220 и S/P200 (коэффициент корреляции равен 0.75 - рисунок 10). В то же время такая корреляция отсутствовала в 1993 - 2001 гг.

На рисунке 11 показана зависимость от времени параметра S/P170 по данным станции ААК (для са-

мого верхнего рассмотренного диапазона глубин). Величины S/P170 варьируются в диапазоне 0.16 - 0.53, в среднем $S/P170=0.34\pm 0.10$. В данном случае существует тенденция небольшого роста параметра со временем, начиная с 1996 г. На рисунке 12 представлена зависимость между параметрами S/P200 и S/P170. Видно, что на фоне разброса данных, корреляция указанных параметров не наблюдается (в отличие от рисунков 6 и 9).

Из полученных данных следует, что средние величины S/P минимальны для диапазона глубин 211 - 230 км, а максимальны – для диапазонов 151 - 210 и 191 - 210 км. Таким образом, на глубинах ~200 - 220 км имеет место наибольший контраст значений S/P. Вместе с тем, временные вариации величин S/P значительно больше для нижней половины рассматриваемого разреза ($h=211 - 270$ км), чем для верхней.

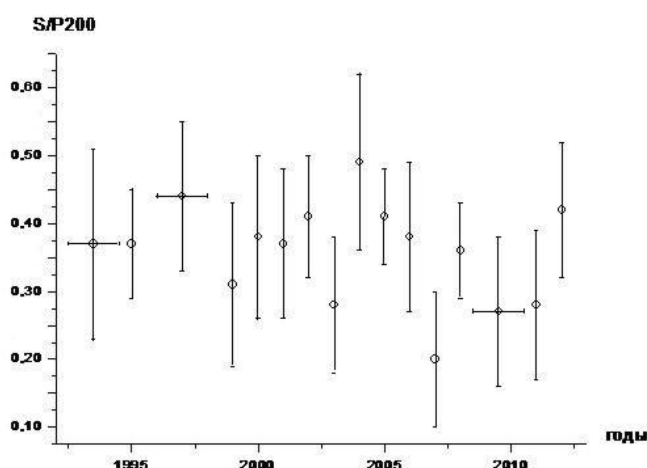
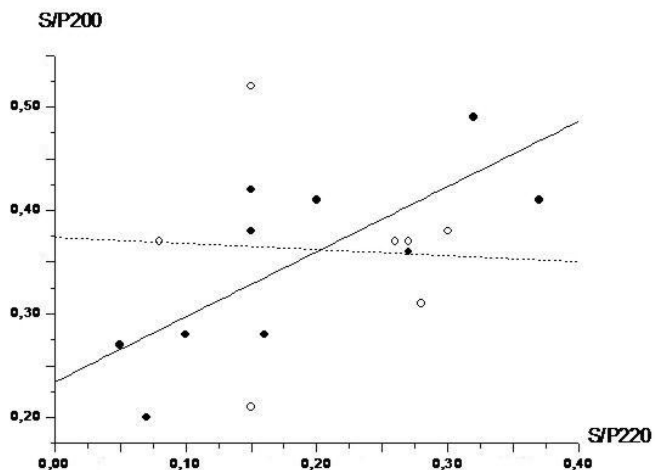


Рисунок 9. Временные вариации параметра S/P200 (по данным станции ААК)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН
В РАЙОНЕ ГИНДУКУША И ИХ СВЯЗЬ С ГЛУБОКОФОКУСНОЙ СЕЙСМИЧНОСТЬЮ



Незалитый значок – данные за 1993 - 2001 гг., залитый – за 2002 - 2012 гг. Прямые – соответствующие линии регрессии

Рисунок 10. Корреляционная зависимость параметров S/P220 и S/P200 (по данным станции ААК)

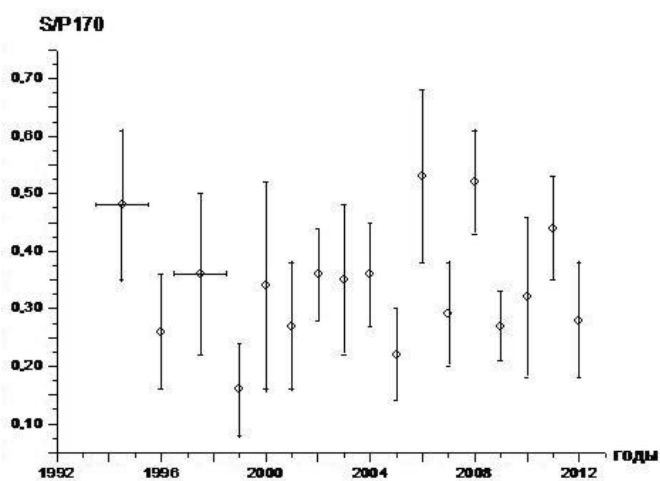


Рисунок 11. Временные вариации параметра S/P170 (по данным станции ААК)

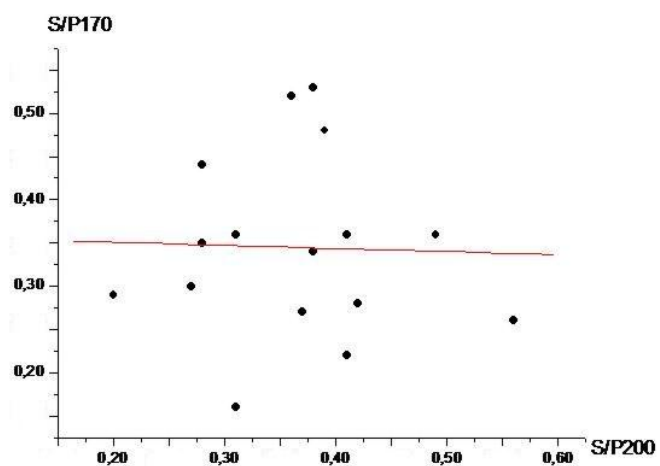


Рисунок 12. Корреляционная зависимость параметров S/P200 и S/P170 (по данным станции ААК)

ОБСУЖДЕНИЕ

Установлены существенные временные вариации значений параметра S/P для гиндукушских землетрясений в разных диапазонах глубин. Следует заметить, что такие вариации не связаны с особенностями диаграмм направленности излучения P - и S -волн, поскольку проведено осреднение данных для каждого отрезка времени. В связи с этим можно полагать, что наиболее естественное (если не единственное) объяснение обнаруженных эффектов связано с изменением содержания глубинных флюидов на трассах от очага до станции (как известно, всего лишь 1% объемного содержания флюида может приводить к уменьшению скоростей S -волн на 10% и резкому увеличению поглощения [10]). При этом изменение доли флюидов может происходить как в очаговой области (в результате процессов их миграции, а также гидратации и дегидратации мантийных пород [5]), так и в нижней коре и верхах мантии в области регистрирующей станции [7].

Выше было отмечено, что наиболее сильные временные вариации поля поглощения в районе расположения станций в Северном Тянь-Шане, наблюдаются в нижней коре. Полученные выше оценки свидетельствуют о том, что в районе регистрирующей станции для разных диапазонов глубин очагов зоны Френеля на границе M в значительной степени перекрываются. Отсюда следует, что если бы вариации параметра S/P были следствием изменения доли флюидов, главным образом, в нижней коре в области станции, то они были бы синхронными для разных слоев в очаговой зоне. В то же время, как показано выше, для слоев 151 - 190 и 191 - 210 км корреляция параметров S/P отсутствует, а для более глубоких слоев наблюдается даже отрицательная корреляция. Кроме того, в этом случае трудно ожидать синхронного изменения в течение 15 лет содержания флюидов в областях двух станций, удаленных на расстояние около 60 км (ААК и ЕКС2). Отсюда следует, что в изучаемом случае основные вариации значений параметра S/P связаны с изменением содержания флюидов непосредственно в зоне глубокофокусной сейсмичности.

Относительно низкие средние величины S/P для глубин 211 - 270 км свидетельствуют о более высоком содержании флюидов в очаговой зоне по сравнению с глубинами 151 - 210 км. При этом наибольший контраст значений S/P наблюдается между слоями 191 - 210 и 211 - 230 км. Это позволяет предположить, что слой на глубинах 191 - 210 км служит слабопроницаемой перегородкой для флюидов, сконцентрированных глубже.

Повышенное содержание флюидов в слое 211 - 270 км и пониженное – на глубинах 151 - 210 км, скорее всего, связано с преобладанием процессов соответственно дегидратации высокоплотных гид-

росиликатов и гидратации мантийных пород на таких глубинах [5]. Отрицательная корреляция величин $S/P250$ и $S/P220$ свидетельствует о том, что свободные флюиды периодически “впрыскиваются” в слой на глубинах 211 - 230 км. В обычных условиях дальнейший подъем флюидов в слабопроницаемый слой на глубинах 191 - 210 км затруднен, поэтому флюиды частично переходят в связанное состояние в результате процессов гидратации [5]. В то же время перед сильнейшими землетрясениями в слой на глубинах 211 - 230 км, очевидно, поступает снизу аномально большая порция флюидов. В случае, когда флюиды образуют связную сеть, обеспечивается концентрация напряжений на ее кровле [11], что и может, в конечном счете, приводить к подвижке при сильном сейсмическом событии. Полученные данные свидетельствуют о том, что сильнейшие глубокофокусные землетрясения обеспечивают “прорыв” части флюидов в слой на глубинах 191 - 210 км. Кроме того, такие события, видимо, активизируют процессы дегидратации в самом нижнем рассматриваемом слое, о чем говорит резкое падение параметров $S/P250$ в течение нескольких лет после двух землетрясений с $M \geq 7.0$ (как известно, на дегидратацию пород расходуется дополнительная энергия [5], в качестве которой может выступать энергия сейсмических волн). Вместе с тем, непосредственно перед такими событиями, видимо, интенсифицируются процессы гидратации мантийных пород в слое 211 - 230 км, о чем свидетельствует, в частности, резкий рост значений параметра S/P за 1-2 месяца до землетрясения 03.03.2002 г.

Таким образом, имеются большие основания считать, что сильнейшие глубокофокусные события в районе Гиндукуша происходят благодаря подъему глубинных флюидов в очаговую зону. Отметим, что аномально высокие и очень низкие величины S/P перед сильными землетрясениями в диапазонах глубин 231 - 270 и 211 - 230 км, соответственно, вероятно, могут служить прогностическим признаком. Это представляет особый интерес, в частности, в связи с тем, что нередко через несколько месяцев после сильнейших гиндукушских событий происходят сильные коровые землетрясения в обширном регионе Центральной и Южной Азии [4].

Следует заметить, что процессы дегидратации океанической коры и подъема флюидов давно известны в зонах субдукции, однако там они происходят на значительно меньших глубинах (обычно до 70 км [12]). Большие глубины, на которых наблюдаются такие процессы в районе Гиндукуша, очевидно, связаны с гораздо более слабым разогревом верхней мантии, о чем, свидетельствует, в частности, отсутствие молодого вулканизма, а также очень высокие скорости сейсмических волн на глубинах около 200 км [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Roecker, S. Velocity structure of the Pamir-Hindu Kush region: possible evidence of subducted crust / S. Roecker // J. Geophys. Res., 1982. – V. 87. – P. 945 - 959.
2. Roecker, S. Seismicity and fault plane solutions of intermediate depth earthquakes in Pamir-Hindu Kush region / S. Roecker [et al.] // J. Geophys. Res., 1980. – V. 85. – P. 1358 - 1364.
3. Pegler, G. An enhanced image of the Pamir- Hindu Kush seismic zone from relocated earthquake hypocenters / G. Pegler, S.Das // Geophys. J. Int. 1998. – V. 134. – P. 573 - 595.
4. Копничев, Ю.Ф. Пары сильных землетрясений и геодинамические процессы в районе Центральной и Южной Азии / Ю.Ф. Копничев, И. Баскутас, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2002. – № 5. – С. 49 - 58.
5. Калинин, В.А. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. / В.А.Калинин, М.В. Родкин, И.С. Томашевская // М.: Наука, 1989. – С. 157.
6. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М. Наука: 1985. С. 176.
7. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Центрального Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2007. – № 5. – С. 54 - 70.
8. Бакиров, А.Б. (ред.). Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. Бишкек: Илим, 2006. – С. 116.
9. Bielinski, R. Lithospheric heterogeneity in the Kyrgyz Tien Shan imaged by magnetotelluric studies / R. Bielinski [et al.] // Geophys. Res. Lett., 2003. – N 15.
10. Hammond, W. Upper mantle seismic wave velocity: effects of realistic partial melt geometries / W. Hammond, E. Humpreys // J. Geophys. Res., 2000. – V. 105. – P. 10975 - 10986.
11. Gold, T. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes / T. Gold, S. Soter // Pageoph. 1984/1985. – V. 122. – P. 492 - 530.
12. Yamasaki, T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab / T.Yamasaki, T. Seno // J. Geophys. Res. – V. 108., N B4. doi: 10.1029/2002JB001918.

ГИНДУКУШ АУДАНЫНДА S-ТОЛҚЫНДАР ЖҰТЫЛУ ӨРІСІНІҢ КЕҢІСТІК-УАҚЫТТЫҚ
ВАРИАЦИЯЛАРЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ТЕРЕҢТОҒЫСТЫ СЕЙСМИКАЛЫЛЫҚПЕН БАЙЛАНЫСЫ

¹Копничев Ю.Ф., ²Соколова И.Н.

¹*РФА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институт, Мәскеу, Ресей*

²*ҚР ҰАО РМК Геофизикалық зерттеулер институты исследований, Курчатова, Қазақстан*

1993-2012 ж.ж Ала-Арша (ААК) және Еркінсай (ЕКС2) қырғыз станцияларымен ~650 - 800 км. эпиорталық қашықтықтарда тіркелген S және P (S/P параметрі) толқындарда максимум амплитудалардың қатынасы өзгеру бойынша Гиндукуш ауданында көлденең толқындардың жұтылу өрісінің кеңістік-уақыттық вариациялары зерттелуде. 231 - 270 және 211- 230 км тереңдіктерінде гипоорталықтар үшін S/P параметрлердің теріс корреляциясы байқалатыны көрсетілген. 211 - 230 км. және 191 - 210 км. тереңдіктері үшін, 2002 ж. бастап, 2002 ж. 03.03-індегі аса қатты тереңтоғысты жерсілкінуден (M=7.4) кейін, S/P параметрлердің корреляциясы орын алады. Айқындалған әсерлер тереңдегі флюидтер көтерілуімен, сондай-ақ мантиялық таужыныстардың гидратациясы мен дегидратациясына байланысты болуы жорамалдануда.

SPATIO-TEMPORAL VARIATIONS OF S WAVE ATTENUATION FIELD
IN THE REGION OF HINDU KUSH AND THEIR RELATION TO SEISMICITY

¹Yu.F. Kopnichev, ²I.N. Sokolova

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

²*Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

We have been investigating spatio-temporal variations of shear wave attenuation field in the Hindu Kush region. We considered ratios of maximum amplitudes in S and P waves (parameter S/P) using recordings by stations AAK and EKS2, obtained in 1993 - 2012 at epicentral distances of ~ 650 - 800 km. It was shown, that negative correlation of S/P parameters is observed for hypocenters at depth of 231 - 270 and 211 - 230 km. At the same time the positive correlation takes place for depth ranges of 211 - 230 and 191-210 km since 2002, after the large deep-focus earthquake of 03.03.2002 (M=7.4). We suppose, that these effects are connected with processes of deep-seated fluids ascending, and also hydration and dehydration of mantle rocks.

УДК 55(092)

В.И. ВЕРНАДСКИЙ И МОНИТОРИНГ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Васильев А.П.

Служба специального контроля Министерства обороны РФ, Москва, Россия

12 марта (28 февраля по старому стилю) 2013 г. исполняется 150 лет со дня рождения крупнейшего ученого, мыслителя и организатора науки XX века. Создатель многих научных школ, в круг интересов которого входили геология и кристаллография, минералогия и геохимия, он основал новую науку биогеохимию, создал учение о ноосфере. В годы Великой Отечественной войны, поселившись вместе с другими учеными в казахстанском Боровом Вернадский завершил свой капитальный труд "Химическое строение биосферы Земли и ее окружение", окончательно сформулировал основные положения жизни в ноосфере, обдумывал совершенствование организации работы АН СССР и несколько раз по этому поводу обращался с записками к Президенту АН СССР, в том числе, о восстановлении работ по урану как источнике новой мощной энергии: «...Сумеет ли человек воспользоваться этой силой, направить её на добро, а не на самоуничтожение? Дорос ли он до умения использовать ту силу, которую неизбежно должна дать ему наука?..»

В 2000 г. в пос. Боровое (Акмолинская обл. Республики Казахстан) была проведена первая Международная конференция «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий» (рисунок 1).

Выбор места проведения конференции был не случайным. Здесь с 1960 г. действовала сейсмическая станция Спецсектора ИФЗ АН СССР, которая с годами разрослась в солидную лабораторию по испытанию нового геофизического оборудования и была наиболее эффективной в СССР при регистрации ядерных испытаний на полигоне в штате Невада, США. В 1994 г. на её базе создана Геофизическая обсерватория Национального ядерного центра Республики Казахстан, получившая широкую известность благодаря большому сохраненному и накопленному объему цифровых записей взрывов и землетрясений, зарегистрированных при уникально низком уровне сейсмического фона.

«Но какая связь между проблемами контроля ядерных испытаний и В.И. Вернадским?» - спросит

нетерпеливый читатель. Вряд ли на этот вопрос ответил бы кто-нибудь из участников конференции 2000 г. Конечно, известно, что В.И. Вернадский, являясь великим учёным-натуралистом, провёл большую исследовательскую и организаторскую работу по поиску месторождений урановых руд и изучению радиоактивности. В частности, он участвовал в экспедиции в Среднюю Азию и получил первые радиоактивные материалы из Тюя-Муюнского месторождения (рисунок 2), создал и возглавил Радиевый институт АН СССР, и это послужило основой для успешного осуществления в дальнейшем Советского атомного проекта. Однако до первого испытания атомного заряда в Аламогордо, в США В.И. Вернадский не дожил 7 месяцев и, естественно, ни о ядерных испытаниях, ни о мониторинге таких испытаний специального научного наследия нам не оставил.



Рисунок 1. Лабораторный корпус Геофизической обсерватории «Боровое», где проходила конференция и участники Международной конференции



*Рисунок 2. Академик Владимир Иванович Вернадский.
Справа - В.И. Вернадский с помощником в одной из полевых экспедиций*



Рисунок 3. Музей имени Абылай хана в Боровом

В 2004 г. во время III Международной конференции её участники посетили Музей имени Абылай хана в Боровом (рисунок 3), что заставило по-другому взглянуть на этот вопрос.

В музее, наряду с краеведческими материалами по Боровому и Казахскому государства, оказалась экспозиция документов и фотографий о пребывании в Боровом в годы Великой Отечественной войны большого количества эвакуированных выдающихся учёных и среди них - В.И. Вернадского (рисунок 4). Собирателю и хранителю музея - Турсынбаевой

Амине Даулетовне (рисунок 5) в 13 - 16-летнем возрасте посчастливилось общаться с эвакуированными учёными, а к моменту нашей встречи, кроме личных впечатлений об этих давних событиях, она обладала обширными знаниями о пребывании учёных в Боровом. Поэтому первая встреча участников конференции с Аминой Даулетовной - одарённой рассказчицей, буквально потрясла новыми сведениями о жизни и творчестве крупнейших советских учёных, эвакуированных в Боровое.



Рисунок 4. Комната Вернадского в Музее имени Абылай хана



Рисунок 5. Амина Даулетовна Турсынбаева – собиратель и хранитель Музея имени Абылай хана. В правом верхнем углу – она же в девичестве

Было рассказано, как В.И. Вернадский, работая здесь над своей «книгой жизни» - «Химическое строение биосферы Земли и её окружения», продолжал обдумывать меры по совершенствованию организации исследований в АН СССР, опираясь на грядущее широкое использование атомной энергии. Из Борового академик Вернадский направил Президенту АН СССР четыре записки по этому вопросу. 13 марта 1943 г. в письме академиком В.Л. Комарову, А.Ф. Иоффе и В.Г. Хлопину из Борового Владимир Иванович писал: «Я считаю, необходимым немедленно восстановить деятельность Урановой комиссии, имея в виду как возможность использования урана для военных нужд, так и необходимость быстрой реконструкции последствий разрушений от гитлеровских варваров, произведённых в нашей стране. Для этого необходимо ввести в жизнь источники новой мощной энергии» [«Владимир Иванович Вернадский. Дневники 1943 - 1943». М. РОССПЭН, с. 495] - рисунок 6.

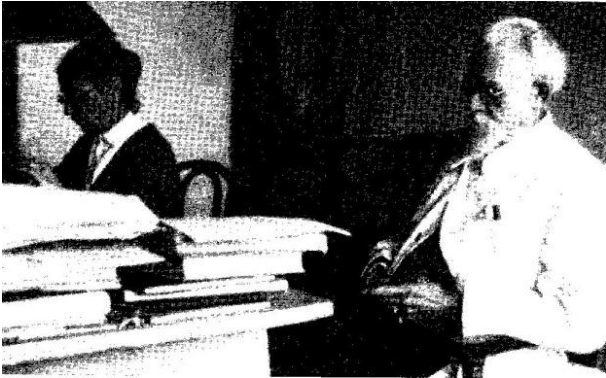


Рисунок 6. Вернадский В.И. и учёный секретарь Шаховская А.Д. за работой в Боровом

Наиболее созвучными участникам конференции были мысли В.И. Вернадского, сформулированные им в далёком 1922 г. и опубликованные в 1988 г. в статье «Об ответственности учёных» [Вернадский В.И. Философские мысли натуралиста. М. Наука, 1988. С. 395]: «Мы подходим к великому перевороту в жизни человечества, с которым не могут сравниться все им раньше пережитое. Недалеко время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который даст ему возможность строить свою жизнь, как он захочет. Это может случиться в ближайшие годы, может случиться через столетие. Но ясно, что это должно быть. Сумеет ли человек воспользоваться этой силой, на-

править её на добро, а не на самоуничтожение? Дорос ли он до умения использовать ту силу, которую неизбежно должна дать ему наука?»

Очень хочется думать, что этими принципами руководствовались основные державы ядерного клуба при принятии решения в 1963 г. об ограничении ядерных испытаний в трёх средах, а в 1996 г. - при подписании Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). Конечно, хотелось бы, чтобы до логического конца был доведён процесс запрещения таких испытаний, а в перспективе и уничтожения всего ядерного оружия. Однако, даже вступление в силу такого нужного для поддержания равновесия «биосферы Земли и её окружения» договора, как ДВЗЯИ, до сих пор является проблемой из-за отказа ратификации со стороны США, инициировавших заключение этого Договора, и нескольких других стран.

Проводимые раз в два года конференции «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий» способствуют совершенствованию методологических, аппаратных основ контроля и позволяют глубже разобраться с вредными последствиями, нанесёнными и продолжающимся, от массовых ядерных испытаний прошлого. Одновременно, начиная с 2004 г., крепнет связь между участниками конференций и хранилищем памяти о В.И. Вернадском и другими учёными, проводимыми в Боровом тяжёлые годы войны. В 2008 г. А.Д. Турсынбаева была официальным участником V конференции (рисунок 7). Она сделала сообщение о жизни и творчестве В.И. Вернадского в Боровом, провела несколько экскурсий в музей для участников конференции (рисунки 8, 9) В том же году А.Д. Турсынбаева познакомила автора этой статьи с рукописью П.В. Шкрыля «В Боровом, в годы войны», в которой местным журналистом собраны практически все возможные (по состоянию на 1994 г.) материалы об учёных, живших и работавших в Боровом в 1941 - 1944 годы. (рисунок 10) Участники конференции узнали о содержании рукописи в талантливом пересказе Амины Даулетовны, обрамлённом её воспоминаниями о тяжёлых военных годах и эпизодах общения с учёными. Спустя полтора года участники конференции получили новые подтверждения правоты А.Д. Турсынбаевой и П.В. Шкрыля после опубликования в Москве книги «Владимир Иванович Вернадский. Дневники 1941 - 1943».



Рисунок 7. А.Д. Турсынбаева рассказывает о жизни В.И. Вернадского в Боровом на V Международной конференции



Рисунок 8. Экскурсия участников конференции в Комнате Вернадского. Слева Генеральный директор НЯЦ РК Кадыржанов К.К.



Рисунок 9 V Международная конференция в Боровом. Слева направо: Ш.Х. Эскара – директор Музея имени Абылай хана, Зербо Лассина – директор отделения Международного центра данных в Вене, А.Д. Турсынбаева, Кемерейт Роберт – старший научный сотрудник Центра прикладных технологий США



Рисунок 10. Турсынбаева А.Д. знакомит автора с рукописью П.В. Шкрыля «В Боровом, в годы войны»

В 2010 г. в рубрике «Малоизвестные страницы Великой Отечественной войны» газета «Правда» опубликовала статью автора «Запасной плацдарм для академиков», а в том же году в Казахстане и России было отмечено 150-летие со дня рождения Натальи Егоровны Вернадской, супруги В.И. Вернадского, скончавшейся в Боровом 2 февраля 1943 г. и похороненной на местном кладбище (рисунок 11). Юбилей Натальи Егоровны Вернадской был отме-

чен статьями в «Казахстанской правде» и в «Вестнике Национального ядерного центра Республики Казахстан».

С каждой проводимой конференцией В.И. Вернадский становится всё ближе ее участникам, несмотря на то, что в связи с переносом геофизической обсерватории «Боровое» на новое место конференции в 2010 и 2012 гг. прошли в г. Курчатове, вблизи Семипалатинского полигона (рисунки 12, 13).



Могила Н. Е. Вернадской (Старицкой). Боровое
Фото 1943 г.
АРАН. Ф.518. Оп. 2. Д.23. Л. 2 об.
Публикуется впервые



Рисунок 11. Могила Натальи Егоровны Вернадской в Боровом. Слева - в 1943 г. (фото из книги «Владимир Иванович Вернадский. Дневники 1941-1943»). Справа - в 2012 г. (стоят: Ш.Х. Эскара, А.П. Васильев, В.В. Лелеко)



Рисунок 12. Курчатов. Памятник академику И.В. Курчатову – научному руководителю Атомного проекта СССР и великому гуманисту

В Курчатове участники конференции побывали на месте первых атомного и термоядерного испытаний, познакомились в музее НЯЦ РК и наяву, на площадках Семипалатинского полигона, с последствиями мощи военного атома. Здесь явственнее осознается не только талант научного лидера Советского атомного проекта И.В. Курчатова, но и его гуманизм, ответственное отношение к использованию атомной энергии. Созданное под руководством академика Курчатова атомное и водородное оружие охладило бывших союзников, готовивших планы атомного нападения на СССР, однако не столь широко известно, как Игорь Васильевич переживал за колоссальный вред, наносимый испытаниями экологии. Именно он был инициатором запрещения воздушных ядерных испытаний, поощрял академика А. Д. Сахарова к публика-



Рисунок 13. Монумент «Сильнее смерти» в парке Мира в г. Семей, созданному в честь закрытия Семипалатинского полигона

ции в открытой печати статьи о накоплении в атмосфере радиоактивного углерода, горячо взялся за проведение совещания экспертов в Женеве в 1958 г. по вопросам контроля испытаний ядерного оружия. Следует напомнить, что именно И.В. Курчатов убеждал научного руководителя ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне академика М.А. Садовского принять участие в совещании в Женеве, на которое в качестве экспертов задумано было пригласить специалистов по обнаружению ядерных взрывов, а также знаменитых физиков и специалистов, лично участвовавших в создании и испытаниях ядерного оружия. Диалог между И.В. Курчатовым (Борода) и М.А. Садовским, опубликованный в статье М.А. Садовского в «Вестнике Российской Академии наук в 1994 г. (том 64, с.835), заканчивался так: «... Твое дело по-

Усилиями руководства Национального заповедника «Бурабай» начаты работы по учреждению нового туристического маршрута «Тропа Вернадского», в который должно войти посещение бывшего «Курорта Боровое», где жили учёные, Музея имени Абылай хана, академического участка боровского кладбища, где похоронены жена В.И. Вернадского Наталья Егоровна, а также несколько учёных и членов их семей. В маршрут должно быть включено и сохранившееся здание конторы бывшего госзаповедника «Боровое». В состав учёного совета госзаповедника во время Великой Отечественной войны влились учёные, эвакуированные в Боровое, во главе с почётным председателем совета академиком Н.Ф. Гамалеей. К октябрю 2012 г. на терри-

тории бывшего «Курорта Боровое» отреставрирована каменная лестница, ведущая от нижней дороги вверх по склону к фундаменту бывшей библиотеки (рисунок 16).

Пока это первое практическое дело в осуществлении задуманного. Есть надежда, что к 12 марта 2013 г. на месте дачи № 37, где проживал В.И. Вернадский с семьёй, будет восстановлена мраморная плита с надписью «Здесь в годы Великой Отечественной войны жил и работал академик Владимир Иванович Вернадский» (рисунок 17), будут облагорожены ограды и надгробные плиты на могилах учёных, а на здании бывшей конторы государственного заповедника «Боровое» будет установлена мемориальная доска (рисунок 18).



Рисунок 16. Территория бывшего санатория «Курорт Боровое». Каменная лестница: справа – до, слева – после реставрации (в 2012 г.)



Рисунок 17. Дача № 37, где во время войны жила семья Вернадских. Слева мемориальная доска (ни то, ни другое в настоящее время не сохранилось)



Рисунок 18. Существующее здание бывшей конторы госзаповедника «Боровое», где заседал учёный совет, в состав которого влились эвакуированные учёные во главе с почётным председателем академиком Н.Ф. Гамалеей

Через двенадцать лет с начала проведения конференций в Боровом «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий» всё более ярко и отчётливо вырисовывается картина духовной связи между идеями ноосферы В.И. Вернадского, разрабатываемыми им в Боровом, и сутью содержания этой конференции. По мнению автора и многих участников конференции, особенно тех, кто занимается вопросами мониторинга последствий ядерных испытаний, вторая часть названия конференции должна стать более значимой. Думается, что организаторы следующей VIII Международной конференции введут в программу новый дополнительный раздел «Биогеохимические последствия ядерных испытаний», что будет соответствовать на более всестороннему подходу к изучению явления, практиковавшемуся В.И. Вернадским.

Автор отдаёт себе отчёт, что статья является каплей в море подготовки к 150-летию со дня рождения В.И. Вернадского. Результаты творчества В.И. Вернадского по масштабу несравнимы с затронутой частью вопросов, касающихся его жизни и работы в Северном Казахстане во время Великой Отечественной войны, хотя этот плодотворный период стал важнейшим этапом в создании теории ноосферы, актуальнейшей для современной жизни и будущего планеты. Все они будут, наверняка, отражены в тех многочисленных мероприятиях, которые предусмотрены в России, Казахстане и многих других странах в связи с объявленным ЮНЕСКО 2013 годом - Годом В.И. Вернадского (рисунок 19).

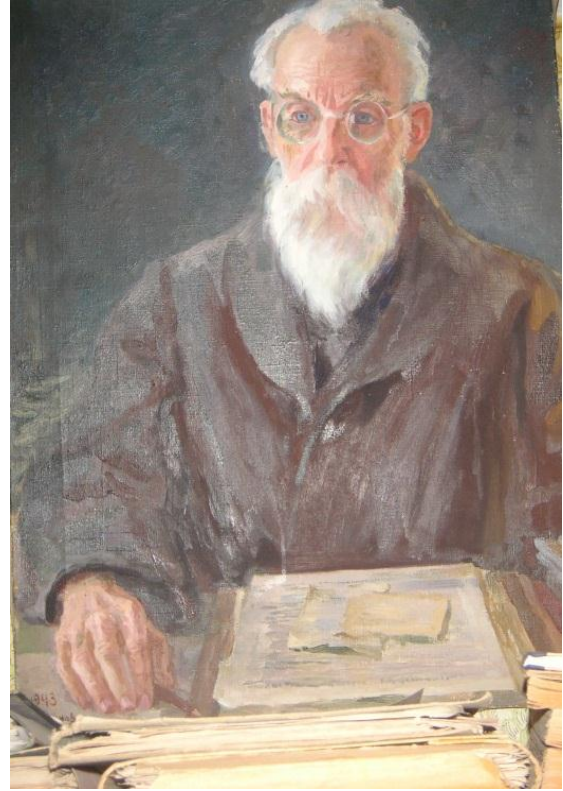


Рисунок 19. Фотокопия картины «Владимир Иванович Вернадский в Боровом» кисти Зерновой, дочери академика С.А. Зернова, жившей в Боровом во время войны (хранится в Кабинете-музее имени В.И. Вернадского в ГЕОХИ, г. Москва)

В.И. ВЕРНАДСКИЙ ЖӘНЕ ЯДРОЛЫҚ СЫНАҚТАРДЫҢ МОНИТОРИНГІ (ТУҒАН КҮНІНЕН 150-ЖЫЛДЫҒЫНА)

Васильев А.П.

РФ Қорғаныс министрлігінің Арнайы бақылау қызметі, Мәскеу, Ресей

2013 ж. 12 наурызда (ескіше жыл санау бойынша 28 ақпан) XX ғасырдың ірі ғалымы, ойшылы, ғылым ұйымдастырушысы туғанына 150 жыл толады. Мүддесі шеңберіне геология және кристаллография, минералгия және геохимия кіретін, көп ғылыми мектептерін құрушы, ол биогеохимия жаңа ғылымның негізін салған, ноосфера туралы ілімін жасаған. Ұлы отан соғысы жылдарында, басқа ғалымдармен бірге Бурабайды мекендеп, «Жер биосферасының химиялық құрылысы және оның қоршауы» атты өзінің күрделі еңбегін аяқтаған, ССРО ҒА президентіне, энергияның жаңа қуатты көзі ретінде уран бойынша жұмыстарды қалпына келтіру туралы хат жіберген. «Осы күшті пайдалануға, оны өзін-өзі құртуға емес, жақсылыққа бағыттауға адамның қолынан келеме? Оған ғылым қайткен күні беретін күшті пайдалану іскерлігіне ол жетті ме?»

**V.I.VERNADSKY AND MONITORING OF NUCLEAR TESTS
(TO THE 150TH ANNIVERSARY)**

A.P. Vasilyev

Special Control Service, Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow, Russia

On March 12 (on February 28 according to aged style) 2013 is 150 years since the birth of the largest scientist, the thinker and the organizer of science of the XX century. The founder of many science schools which also focused his interest on geology and a crystallography, mineralogy and a geochemistry, who based a new science of biogeochemistry, created the doctrine about the noosphere. In days of the Great Patriotic War, having moved together with other scientists in Borovoye Vernadsky finished his capital work "Chemical Constitution of Biosphere of the Earth and Its Environment", addressed to the President of Academy of Sciences of the USSR with the letter where appealed for resumption of works on uranium as a source of new powerful energy. "Whether the man will manage to use this power, to direct it on good, instead of on self-destruction? Whether the man is mature enough to use that power which the science will inevitably give to him?"

СПИСОК АВТОРОВ

Барсуков Н.И., 12
Большакова И., 4
Васильев А.П., 62
Васильевский И., 4
Виерербл Л., 4
Витюк Г.А., 20
Голяка Р., 4
Гордиенко Ю.Н., 12
Данлыбаева А.К., 28
Дюран И., 4

Ерашок В., 4
Загачевский Ю., 4
Заурбекова Ж.А., 12
Кенжин Е.А., 12
Коварик К., 4
Коноплева Р., 4
Копничев Ю.Ф., 33, 42, 53
Котов В.М., 20
Куликов С., 4
Кульсартов Т.В., 12

Курнаев В., 4
Макидо Е., 4
Понкратов Ю.В., 12
Соколова И.Н., 33, 42, 53
Сураев А.С., 20
Тажибаева И.Л., 12
Темиралиев А.Т., 28
Тулубаев Е.Ю., 12
Чеканов В., 4
Шурыгин Ф., 4

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 междустрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается основной текст.

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 ГОСТу 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов *.tif, *.gif, *.png, *.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, адрес 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 А.Г. Кислухин
тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: KISLUHIN@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2. Здание «54».
<http://www.nnc.kz/vestnik>

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2012.

Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000г.
Выдано Министерством культуры, информации и общественного согласия Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2. Здание «54».

