

**РУСАКОВА АЛЕНА ВИКТОРОВНА**

**«Влияние облучения высокоэнергетичными тяжелыми ионами на структурно – фазовые состояния и физико – механические свойства нержавеющей сталей»**

6N0604 «Физика»

**Автореферат**

на соискание академической степени магистра естественных наук

Республика Казахстан  
Усть-Каменогорск,  
2011

Работа выполнена в Восточно-Казахстанском государственном техническом университете имени Д. Серикбаева.

Научный руководитель от ИЯФ НЯЦ РК:	Доктор физико-математических наук, заведующей лабораторией радиационного материаловедения, Максимкин О.П.
Научный руководитель от ВКГТУ им. Д. Серикбаева:	Доктор физико-математических наук, профессор Плотников С.В.
Официальный оппонент:	к.т.н., доцент кафедры «Физика», ВКГУ им. С. Аманжолова, Жакупова А.Е.
Ведущая организация	Восточно – Казахстанский государственный технический университет им. Д Серикбаева

Защита состоится 20 июня 2011 года в 9:00 на заседании диссертационного совета при Восточно – Казахстанском государственном техническом университете им. Д. Серикбаева, по адресу ул. Серикбаева 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Восточно – Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева, расположенной по адресу ул. Серикбаева 19, читальный зал.

Автореферат разослан 25 мая 2011.

Ученый секретарь

диссертационного совета:

Журерова Л.Г.

**Объем:** 67 страниц; структура диссертации: титульный лист; содержание; нормативные ссылки; определения, обозначения и сокращения; введение; литературный обзор; материалы и методы исследования; экспериментальные результаты и их обсуждение; заключение; список использованных источников.

**Количество иллюстраций:** 43; **количество таблиц:** 7; **количество использованных литературных источников:** 85.

**Перечень ключевых слов:** Облучение высокоэнергетическими частицами, тяжелые ионы, фазовые превращения, реакторные материалы, аустенитная нержавеющая сталь 12X18H10T, имплантация, дефекты структуры, упрочненный поверхностный слой, распыление, энергия дефекта упаковки, мартенсит, вторичные образования, усталостные испытания.

**Актуальность исследования:**

Многолетний опыт постэксплуатационных исследований состояния реакторных материалов показал, что в них под воздействием облучения в полях напряжений и температуры происходят фазово-структурные превращения, которые чаще всего нежелательны и приводят к деградации материалов. В результате ухудшается пластичность и коррозионная стойкость нержавеющих сталей, увеличивается скорость радиационного набухания и возникают другие негативные явления. Интерес к исследованиям фазовой стабильности сталей и сплавов под облучением особенно возрос в последнее время в связи с перспективой создания термоядерных установок, в которых прогнозируются сравнительно большие скорости и дозы повреждения.

Выполненные в данном направлении экспериментальные и теоретические работы, направленные, в основном, на создание радиационноустойчивых конструкционных материалов, несмотря на определенные успехи, не исчерпывают всех аспектов проблемы. Так, к настоящему времени мало исследованы мартенситные бездиффузионные  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращения, протекающие при деформации (или облучении) в метастабильных аустенитных сталях, в результате которых образуется более прочная ферромагнитная  $\alpha'$ - фаза.

Для изучения закономерностей эволюции радиационных эффектов, связанных с поведением имплантированных ионов, а также для моделирования процессов деградации металлов и сплавов используется облучение материалов тяжелыми ионами инертных газов

**Цель исследования:** Получение новых результатов по радиационным изменениям структуры и свойств металлических материалов и выявление закономерностей влияния облучения тяжелыми ионами на фазовый и элементный состав, механические и магнитные свойства нержавеющих сталей и сплавов.

**Объекты исследования** – нержавеющие стали типа X18H10T и X15AG14, чистые металлы (Mo, Ni, Fe), сплав никеля с титаном (NiTi).

### **Задачи исследования:**

1. Провести исследования структурно – фазового состояния нержавеющей стали и сплава никелида титана в зависимости от воздействия различными режимами облучения;
2. Установить исследования механических свойств в зависимости от структурно-фазового состояния облученных и необлученных материалов.

### **Методы исследования:**

Изучение структуры и фазового состава сталей, сплава и технически чистых материалов проводили с помощью классических методов исследования, таких как, оптическая, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгенодифракционный фазовый и рентгеноспектральный элементный анализы, а также использовали магнитометрический щуп и методику электросопротивления. Механические испытания образцов заключались в одноосном растяжении и малоцикловых усталостных испытаниях, проводимых при комнатной температуре.

**Научная новизна работы** состоит в том, что в ней впервые систематически экспериментально исследовано влияние облучения высокоэнергетическими тяжелыми ионами ( $^{84}\text{Kr}$ ,  $\text{WC}^+$ ) на закономерности фазово – структурных превращений в нержавеющей стали (NiTi) и сталях 12X18H10T, X15AG14.

**Практическая значимость полученных результатов.** Результаты комплексных исследований нержавеющей стали, облученных тяжелыми ионами в условиях ускорителя ДЦ-60, являются новыми и могут быть использованы при разработке технологий безопасного обращения с отработанным ядерным топливом.

**Личный вклад автора.** В процессе выполнения исследований автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач исследования, изготовлении и облучении образцов, во всех экспериментах с облученными материалами, в обработке полученных результатов и формулировании выводов.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: на 7-ой Международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, 2009); на 50-м Международном симпозиуме «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2010); на VI Международной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (Оренбург, 2010); на VI Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (Черноголовка, 2010); на IX Международном Уральском семинаре «Радиационная физика металлов и сплавов» (Кыштым, 2011).

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Во введении** диссертации обоснованы актуальность и выбор направления исследований, необходимость постановки и проведения данной работы, сформулированы цель и основные задачи, научная новизна и практическая значимость результатов.

**В первом разделе** дан краткий обзор современных представлений о бездиффузионном мартенситном  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении, индуцированном облучением, о природе и механизмах зарождения  $\alpha$ -мартенсита, движущих силах и особенностях протекания мартенситных превращений после облучения. Рассмотрено влияние  $\alpha$ -мартенсита на механические свойства аустенитных нержавеющей сталей.

На основе критического анализа литературных данных сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

**Во втором разделе** обоснован выбор материалов исследования, это нержавеющей стали 12X18H10T и X15AG14, которые были аустенизированы: 1050<sup>0</sup>C 30 мин, никелид титана и технически чистые материалы (Mo, Fe, Ni). Описаны методики облучения высокоэнергетическими ионами <sup>84</sup>Kr на ускорителе ДЦ-60 и WC<sup>+</sup> на ускорителе Диана, а также облучения легкими частицами C<sup>+</sup> и N<sup>+</sup> на ускорителе ЭЛУ-4.

Основными методами исследования облученных материалов служили магнитометрический и металлографический анализы, метод механических испытаний с использованием универсальных испытательных машин "Инстрон 1195" и FP-100/1, растрового (JSM-7500F) и просвечивающего (JEM 100CX) электронных микроскопов, рентгеновского дифрактометра X'Pert PRO, феррозонда "Feritoscope MP30", атомно – силового микроскопа NT-206.

**В третьем разделе** приведены результаты изучения процессов распыления, имплантации и фазово – структурных превращений в нержавеющей стали 12X18H10T, нержавеющей сплаве NiTi и некоторых чистых металлах, облученных высокоэнергетическими ионами <sup>84</sup>Kr. Исследовано влияние облучения нержавеющей сталей (12X18H10T и X15AG14) тяжелыми ионами карбида вольфрама на мартенситное  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение. На основании имеющихся данных показано, как изменяется радиационное упрочнение металлов и сплавов с различной энергией дефекта упаковки. Исследованы фазовые превращения и усталостные свойства нержавеющей стали 12X18H10T, облученной легкими заряженными частицами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные результаты и выводы.

1. Установлено, что радиационное воздействие тяжелыми ионами <sup>84</sup>Kr ( $E=1,56$  МэВ/нуклон, флюенс  $\leq 4 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>) существенным образом изменяет микроструктуру, фазовый состав и

механические свойства приповерхностного слоя аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, толщиной порядка 4 нм.

2. Облучение высокоэнергетическими тяжелыми ионами  $^{84}\text{Kr}$  ( $E=1,56$  и  $1,75$  МэВ/нуклон; флюенсом от  $9 \cdot 10^{15}$   $\text{см}^{-2}$  (для стали) и  $1 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$  (для сплава), приводит к образованию мартенситных ( $\alpha$ ,  $\epsilon$ -фаз) как в образцах аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, так и в никелиде титана NiTi (без дополнительной деформации);
3. Показано, что облучение тяжелыми ионами  $\text{WC}^+$  с энергией 50 кэВ предварительно деформированных образцов аустенитных сталей 12Х18Н10Т и Х15АГ14, приводит к заметному повышению содержания в них мартенситной  $\alpha'$ -фазы. При этом различная склонность сталей к  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращению у данных материалов обуславливает более существенное приращение содержания  $\alpha'$ -фазы в марганцовистой стали, по сравнению с хромо-никелевой. Проявление эффекта «упругого мартенсита» после облучения ионами  $\text{WC}^+$  заметно усиливается, что может быть обусловлено не только ростом содержания  $\alpha'$ -фазы в образцах, но и повышением внутренних напряжений в приповерхностном мартенситосодержащем слое;
4. Методом EBSD установлено, что  $\alpha$ -мартенсит располагается преимущественно внутри зерен, с ориентацией (101) и сам обладает аналогичной ориентацией.  $\epsilon$  – мартенсит располагается в зернах с ориентацией (111). Особенностью  $\alpha$ -фазы (ОЦК-решетка) является чрезвычайная мелкодисперсность (менее 0,1 мкм), наряду с очень большим количеством крупных образований;
5. Установлено, что дополнительный эффект радиационного упрочнения стали 12Х18Н10Т связан с образованием мартенситной  $\alpha'$ -фазы, индуцируемой облучением, что подтверждает известное положение о склонности к  $\gamma \rightarrow \alpha$  переходу метастабильных хромоникелевых сталей, характеризующихся небольшим (несколько МДж/м<sup>2</sup>) значением энергии дефекта упаковки. Показано, что величина относительного изменения прочностных характеристик исследованных материалов в результате ионного облучения тем больше, чем меньше энергия дефекта упаковки;
6. Выявлено, что под воздействием ионов  $^{84}\text{Kr}$  превалирует прямой переход аустенита в мартенсит  $B2 \rightarrow B19'$ . Причем мартенситный переход сдвигается на  $\sim 60$  К к более низким температурам.

7. Облучение легкими заряженными частицами не влияет на механические свойства материалов при растяжении, но играет важную роль в формировании низкотемпературных усталостных изменений стали 12X18H10T, имплантированной азотом и углеродом. Основным фактором, влияющим на число циклов до разрушения является кинетика  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, которая определяется начальным содержанием мартенситной  $\alpha$  – фазы и ее распределением по образцу.

**Публикации:** По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 5 статей и 9 тезисов докладов Международных конференций.

## РУСАКОВА АЛЕНА ВИКТОРОВНА

Тотықпайтын болаттардың құрылым - фазалық күйлеріне және физикалық-механикалық қасиеттеріне жоғары энергиялық ауыр иондардың сәулелендіру ықпалы

6N0604 - физика

магистрдің академиялық дәрежесінің талап етуіне диссертациялық

### ТҮЙІНДЕМЕ

**Көлем:** 67 беттер: диссертацияның құрылымы: сыртқы парак; мазмұн; нормативтік сілтемелері; анықтаулар, белгілер және қысқарту; кіріспе; әдеби шолу; материалдар және зерттеу әдістері; эксперименталді нәтижелер және оларды талқылау; қорытынды; қолданылған әдебиет тізімі.

**Иллюстрациялардың саны:** 43; кестелердің саны: 7; қолданылған әдебиет саны: 85.

**Зерттеудің мақсаты:** Құрылымның радиациялық өзгерістері мен металлдық материалдардың қасиеттері бойынша жаңа нәтижелерді алу, фазалық пен элементтік құрамға және тотықпайтын болаттар мен балқымалардың механикалық пен магниттік қасиеттеріне ауыр иондардың сәулелендіру ықпалының заңдылықтарын анықтау,.

**Зерттеу нысаналар** - тот баспайтын болаттардың X18H10T және X15AG14 түрлері, (Mo, Ni, Fe) таза металлдар, (NiTi) титаны бар никелдің балқымасы.

#### **Зерттеудің есептері:**

1. Сәулелендіру әр түрлі тәртіптерінің әсеріне байланысты тотықпайтын болаттар және титан-никелид балқымасының құрылым-фазалық күйлерін зерттеу өткізу;
2. Зерттелетін материалдарды сәулелендірудің негізгі тетіктерін орнату.

#### **Зерттеудің әдістері:**

Оптикалық, растрлық және жарық түсіретін электрондық микроскопия, рентгенодифракциялық фазалық және рентген спектрлік элементтік талдаулар сияқты зерттеудің классикалық әдістері көмегімен болаттар, балқыма және техникалық таза материалдардың құрылымы және фазалық құрамын зерттеу өткізді, сонымен бірге магнитоөлшегіш сүңгі және электр қарсыласуының әдістемелерін қолданды. Үлгілердің механикалық сынақтары бөлме температурасының жанында өткізілетін бір өсті созылуда және аз циклді шаршаған сынауларда болды.

**Жұмыстың ғылыми жаңалығы** – тот баспайтын (NiTi) балқымасы және 12X18H10T пен X15AG14 болаттарында фазалық құрылымдық түрленулердің заңдылығына жоғары энергетикалық ауыр ( $^{84}\text{Kr}$ ,  $\text{WC}^+$ )

иондарының сәулелендіру ықпалын тұңғыш рет жүйелі түрде эксперименталді зерттеуінде.

**Алған нәтижелердің жаттығу маңыздылығы.** ДЦ-60 үдеткішінің шарттарындағы ауыр ион сәулесіне түсірілген тотықпайтын болаттарды кешенді зерттеулердің нәтижелері жаңа болып табылады және пайдаланылған ядролық отынмен қауіпсіз үндеу технологиясын дамытудың жанында қолдана алады.

**Автордың дербес есебі.** Автор зерттеулерді орындау процессінде зерттеудің мақсаттары мен есептерін қойылуға, үлгілерді жасау және сәулеге түсіруіне, сәулеге түсірілген материалдармен барлық тәжірибелерге, алған нәтижелерді өңдеуге және жадағайла құрастыруға тікелей араласуды қабылдады.

### **Жұмыстың негізгі нәтижелері:**

1.  $^{84}\text{Kr}$  ( $E=1,56$  МэВ/нуклон, флюенс  $\leq 4 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ ) ауыр иондармен радиациялық әсер тот баспайтын 12Х18Н10Т аустенит болатының 4 нм шамасындағы жуандықтық бетінің қасындағы микроқұрылым, фазалық құрам және механикалық қасиетін айтарлықтай өзгерту анықталған.
2.  $^{84}\text{Kr}$  ( $E=1,56$  мен  $1,75$  МэВ/нуклон;  $9 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$  (болат үшін) және  $1 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$ -ден (балқыма үшін) бастап флюенсімен) жоғары энергетикалық ауыр иондармен сәулелендіру аустенит тот баспайтын 12Х18Н10Т болатының үлгілерінде де, титан никелидінде NiTi де (қосымша деформациясыз) мартенсит  $\alpha$ -мен  $\varepsilon$ -фазаларының құрылуына алып келеді.
3. 12Х18Н10Т және Х15АГ14тің аустенит болаттарының алдын ала деформацияланған үлгілерін 50 кэВ энергиясы бар  $\text{WC}^+$  ауыр иондарымен сәулелендіру ішіндегі мартенсит  $\alpha$ -фазасының мазмұнының көрінетін жоғарылатуына алып келуі көрсетілген. Сонымен бірге болаттардың  $\gamma \rightarrow \alpha$  айналуға әртүрлі мейілі осы материалдардағы маргандық болатта хром-никел салыстырғанда  $\alpha$ -фазаның мазмұнының маңызды өсімін ескертеді. Серпімді мартенситтің эффектінің әсер етуі  $\text{WC}^+$  иондарының сәулеге түсіруінен кейін елеулі екпіндеуі үлгілердегі  $\alpha$ -фазаның мазмұнының өсуіне ғана емес, мартенситі бар беттің қасындағы керісінше жіктің ішкі кернеулерінің жоғарылатумен шарттала алған.
4.  $\alpha$ -мартенситтің (101)-бағытты түйірдің ішінде көбінесе орналасуы және өзінің ұқсас бағытқа ие болуы EBSD әдіспен анықталған.  $\varepsilon$ - мартенсит (111)-бағыты бар түйірлерде

- орналасады.  $\alpha$ -фазаның (ОЦК-кереге) ерекшелігі ірі құрылулардың керемет үлкен санымен қатар өте майда дисперсиялық (1 мкм кем) болып табылады.
5. Ораушының мінінің энергиясының ептеген (бірнеше МДж/м<sup>2</sup>) мәнімен сипаттайтын метатұрақтылық хромоникел болаттарының  $\gamma \rightarrow \alpha$  өткеліне мейілі туралы белгілі ережені растайтын 12X18H10T болатының радиациялық қатайтуының қосымша эффектінің сәулелендірумен индукцияланған мартенситтің  $\alpha$ -фазасының құрылуына байланысы анықталған. Иондық сәулелендіру нәтижесінде сол ораушының мінінің энергиясы аз ретінде зерттелген материалдардың берік мінездемелерінің салыстырмалы өзгерісінің шамасы көбірек көрсетілген.
  6. <sup>84</sup>Kr-ші иондардың әсерімен аустениттің В2-В19 мартенситке түзу өткелінің басым болатыны айқындалған. Өзі мартенситтің өткелі ~60 К аз төменірек температураларға қосылысады.
  7. Жеңіл зарядталған бөлшектермен сәулелендіру созылудағы материалдардың механикалық қасиетіне ықпал етпейді, бірақ азотпен және көміртекпен имплантация жасалған 12X18H10T болатының төмен температуралы шаршаған қасиеттерінің құрастырылуға маңызды рөлді ойнайды. Циклдер санының қирауына әсер ететін негізгі фактор – үлгі бойынша үлестірілген және мартенситті  $\alpha$  – фазалары бойынша бастапқыда анықталған  $\gamma \rightarrow \alpha$  түрленуінің кинетикасы болып табылады.

**Жариялаулар:** Диссертациялар материалдары бойынша 14 баспа жұмыстары, олардың ішінде 5 баптар және Халықаралық конференциялара жариялаған 9 баяндама тезистері.

## SUMMARU

The abstract of dissertation submitted for Masters Degree in 6N0604 - Physic specialty

**RUSSAKOVA ALYONA VIKTOROVNA**

### **Effect of high-energy irradiated heavy ions on the structural - phase states and the physical - mechanical properties of stainless steels**

**Total volume:** 67 pages: the structure of the thesis: the title page, table of contents; official references, definitions and abbreviations, introduction, literature review, materials and methods, experimental results and discussion, conclusion, references.

**Number of figures:** 43, number of tables: 7, number of references: 85.

**The purpose of research:** study of radiation changes in the structure and properties of metallic materials and the identification of patterns of influence of irradiation by heavy ions on the phase and elemental composition, mechanical and magnetic properties of stainless steels and alloys.

**The object of research** - stainless steel type 12Cr18Ni10Ti and Cr15AG14, pure metals (Mo, Ni, Fe), an alloy of nickel-titanium (NiTi).

#### **Research objectives:**

1. Study of structural-phase states of stainless steels and nickel-titanium alloy, depending on the impact of different modes of irradiation;
2. Find the basic mechanisms, which takes place in the materials under irradiation.

#### **Methods of research:**

The study of structure and phase composition of steels, alloy and technically pure materials was carried out using classical methods, such as optical, scanning and transmission electron microscopy, X-ray diffraction phase and X-ray elemental analysis, as well as used magnetometer probe and the method of electrical resistance. Mechanical testing of the samples consisted of uniaxial tension and low cycle fatigue tests were conducted at room temperature.

**Scientific priority of the work:** at the first time the influence of high energy heavy ion irradiation ( $^{+84}\text{Kr}$ ,  $\text{WC}^+$ ) on the patterns of phase - the structural transformations in stainless steel alloy (NiTi) and in stainless steels like 12Cr18Ni10Ti, Cr15AG14 was systematically studied.

**The practical application of the results.** The results of stainless steels irradiated with heavy ions in accelerator DC-60 investigations may be used in develop technologies for the safe management of spent nuclear fuel.

**Author's personal contribution.** The author was directly involved in goals and researches objectives setting procedure, in preparation and irradiation of samples in all experiments with irradiated materials, explanation of results and conclusions.

### The main results of the thesis are:

1. It was established that the radiation effects of heavy ions  $^{84}\text{Kr}$  ( $E = 1,56$  MeV / nucleon, fluence  $\leq 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) significantly change the microstructure, phase composition and mechanical properties of the surface layer of austenitic stainless steel 12Cr18Ni10Ti with 4 nm thickness.
2. Irradiation of high-energy heavy ions  $^{84}\text{Kr}$  ( $E = 1,56$  and  $1,75$  MeV / nucleon with a fluence of  $9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  (for steel),  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  (alloy) leads to form a martensite ( $\alpha$ ,  $\epsilon$ -phase) in samples of austenitic stainless steel 12Cr18Ni10Ti and in NiTi (without additional strain).
3. It is shown that irradiation of heavy ions  $\text{WC}^+$  with energy 50 keV previously deformed specimens of austenitic steels 12Cr18Ni10Ti and Cr15AG14 leads to a noticeable increase in their content of martensite  $\alpha'$ -phase. The different propensity of steel to the  $\gamma \rightarrow \alpha'$  transformation of these materials causes a significant increment in the content of  $\alpha'$ -phase in manganese steel, as compared with chromium-nickel. The "elastic martensite" effect was increased after irradiation with  $\text{WC}^+$ , it may be caused not only by increasing content of  $\alpha'$ -phase in the samples, but also by increasing of the internal stresses in the martensite-content pre-surface layer.
4. By the EBSD technique was found that  $\alpha$ -martensite is located mainly inside the grains with orientation (101) and it has a similar orientation.  $\epsilon$ -martensite is located in the grains with orientation (111). The  $\alpha$ -phase has extremely fine dispersity (less than 0.1 microns), with a large-size entities.
5. It is established that the additional effect of radiation hardening steel 12Cr18Ni10Ti may be associated with formation of martensite  $\alpha'$ -phase, induced by irradiation. This data confirms the well-known theory of the tendency to  $\gamma \rightarrow \alpha$  transition of metastable chromium-nickel steels, characterized by small (a few  $\text{MJ/m}^2$ ) value of the stacking fault energy. The relative changes in strength parameters of the studied materials as a result of ion irradiation is greater than the lower stacking fault energy.
6. The direct transition of austenite to martensite  $B2 \rightarrow B19'$  is prevail under the influence of  $^{84}\text{Kr}$  ions and the martensite transition is shifted by  $\sim 60$  K to lower temperatures.
7. Irradiation by light charged particles does not affect the mechanical properties of materials under tension, but plays an important role in the formation of low-temperature fatigue of 12Cr18Ni10Ti steel implanted

with nitrogen and carbon. The main factor the number of cycles before destruction is the function of kinetics of  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation, the last one may be determined by the initial content of the martensite  $\alpha$  - phase and its distribution over the sample.

**Publications:** The thesis experimental data was published in 14 papers: 5 full papers in scientific journals and 9 abstracts of international conferences.