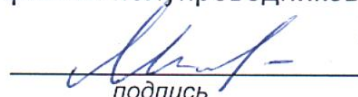


МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заведующая кафедрой  
физики полупроводников и микроэлектроники

  
подпись

(Меньшикова Т.Г.)  
расшифровка подписи

05.06.2025

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.05 Радиационная стойкость интегральной элементной базы

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

03.04.03 Радиофизика

2. Профиль подготовки: Микроэлектроника и полупроводниковые приборы

3. Квалификация (степень) выпускника: магистр

4. Форма образования: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:

физики полупроводников и микроэлектроники

6. Составители программы: Меньшикова Татьяна Геннадьевна

кандидат физико-математических наук, доцент

7. Рекомендована: НМС физического факультета протокол №6 от 04.06.2025

8. Учебный год: 2026-2027 Семестр: 3

9. Цели и задачи учебной дисциплины: целью освоения учебной дисциплины является формирование знаний и умений, необходимых для проектирования радиационно-стойких интегральных схем.

Задачи учебной дисциплины:

- изучение физических основ воздействия радиации на интегральные схемы;
- изучение технологических приемов повышения радиационной стойкости интегральных схем;
- изучение схемотехнических решений, направленных на повышение радиационной стойкости интегральной элементной базы;

- изучение методов проектирования топологии интегральной элементной базы, обладающей повышенной радиационной стойкостью;
- изучение программных пакетов для моделирования радиационных эффектов в интегральных схемах;
- изучение нормативной базы оценки радиационной стойкости интегральных схем.

**10. Место учебной дисциплины в структуре ОПОП:** дисциплина относится к части, формируемой участниками образовательных отношений (вариативная) блока Б1. Для ее усвоения требуются знания, формируемые при освоении ОПОП в рамках курса схемотехники интегральных схем.

**11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:**

Компетенции		Индикаторы		Планируемые результаты обучения
Код	Наименование компетенции	Код(ы)	Наименование индикатора(ов)	
ПК-1	Способен принимать участие в разработке и научных исследованиях систем связи и телекоммуникаций	ПК-1.2	Владеет фундаментальными знаниями в области полупроводниковой СВЧ-электроники	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основные виды радиационных эффектов в интегральных схемах;</li> <li>- основные способы моделирования радиационного воздействия на интегральные схемы;</li> </ul>
ПК-2	Способен принимать участие в разработке и научных исследованиях полупроводниковой элементной базы радиоэлектронных устройств	ПК-2.4	Учитывает условия эксплуатации при проектировании элементной базы радиоэлектроники	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основные технологические, схемотехнические и топологические способы повышения радиационной стойкости интегральных схем;</li> <li>- основные методы испытания радиационной стойкости интегральных схем.</li> </ul> <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- выбирать и реализовывать конструкторское решение, обеспечивающее радиационную стойкость интегральной схемы.</li> </ul> <p><i>Владеть:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками проектирования радиационно-стойких узлов интегральных схем с использованием САПР.</li> </ul>

**12. Объем дисциплины в зачетных единицах/часах — 3 / 108.**

Форма промежуточной аттестации – зачет.

**13. Виды учебной работы:**

Вид учебной работы	Трудоемкость (часы)	
	Всего	По семестрам

			3 сем.
Аудиторные занятия,		64	64
в том числе:	лекции	38	38
	лабораторные работы	26	26
Самостоятельная работа		44	44
Итого:		108	108

### 13.1. Содержание дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины
<b>Лекции</b>		
1.1	Введение	Классификация радиационных эффектов в микроэлектронике. Основные понятия.
1.2	Радиационные эффекты в интегральных схемах	Виды отказов при воздействии радиации. Устойчивые отказы. Исправимые отказы. Механизмы отказов. Накопление заряда в подзатворном диэлектрике. Фототок. Радиационные процессы в скрытом диэлектрике КНИ-структур. Случайные сбои переключения. Защелкивание транзисторов. Повреждение линий питания.
1.3	Технологические решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	Технология КНИ КМОП. Triple-well процесс. БиКМОП технология. Радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектроники. Особенности технологии изготовления многослойных защитных материалов.
1.4	Схемотехнические и программные решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	Модульное, временное, пространственное резервирование. Метод тройного резервирования (TMR). DICE-защелки. Использование структур задержки. Модернизация базовых решений с использованием обратных связей. Коды обнаружения ошибок (EDC). Коды исправления ошибок (ECC). Применение корректирующих кодов.
1.5	Топологические решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	Использование охранных колец. КНИ транзисторы А-типа и Н-типа. Топологии с расширенным затвором, кольцевым затвором, с окруженным истоком/стоком.
1.6	Моделирование радиационных эффектов в интегральных схемах	Учет радиационных эффектов при схемотехническом моделировании. Использование языков проектирования аппаратуры схем смешанного сигнала (Verilog-AMS, VHDL-AMS) Использование программных пакетов моделирования прохождения элементарных частиц через вещество. Моделирование радиационных эффектов в системах приборно-технологического моделирования (TCAD).
1.7	Методы испытания радиационной стойкости интегральных схем	Нормативная база оценки радиационной стойкости ИС. Методы испытаний ИС на радиационную стойкость. Методические основы и технические средства рентгеновских и лазерных имитационных испытаний.
<b>Лабораторные работы</b>		
2.1	Введение	
2.2	Радиационные эффекты в интегральных схемах	
2.3	Технологические решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	
2.4	Схемотехнические ре-	Л.р. № 1. Схемотехническое моделирование КМОП-

	шения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	инвертора с повышенной радиационной стойкостью. Л.р. № 2. Схемотехническое моделирование DICE-защелки
2.5	Топологические решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	Л.р. № 3. Знакомство с САПР проектирования топологии ИС Л.р. № 4. Топологическое проектирование МОПТ, обладающих повышенной радиационной стойкостью
2.6	Моделирование радиационных эффектов в интегральных схемах	Л.р. № 5. Разработка HDL-модели импульса ионизационного тока. Л.р. № 6. Схемотехническое моделирование DICE-защелки при воздействии импульса ионизационного тока.
2.7	Методы испытания радиационной стойкости интегральных схем	

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Виды занятий (часов)			
		Лекции	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Введение	2	-	2	4
2	Радиационные эффекты в интегральных схемах	8	-	8	16
3	Технологические решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	8	-	8	16
4	Схемотехнические и программные решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	8	8	8	24
5	Топологические решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	4	8	6	18
6	Моделирование радиационных эффектов в интегральных схемах	4	10	6	20
7	Методы испытания радиационной стойкости интегральных схем	4	-	6	10
	Итого:	38	26	44	108
	Итого по курсу				108

### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины:

Изучение дисциплины «Радиационная стойкость интегральной элементной базы» предусматривает осуществление учебной деятельности состоящей из двух частей: обучения студентов преподавателем и самостоятельной учебной деятельности студентов по изучению дисциплины.

Метод преподавания – проблемный, форма обучения – групповая, форма общения – интерактивная. Обязательное посещение лабораторных занятий и текущих аттестаций.

Подготовка к лекциям является одним из видов самостоятельной работы студентов. Студентам, чтобы хорошо овладеть учебным материалом, необходимо выработать навыки правильной и планомерной работы. Перед началом лекционных занятий надо просмотреть все, что было сделано в предыдущий раз. Это позволит сосредоточить внимание и восстановить в памяти уже имеющиеся знания по данному предмету.

Кроме того, такой метод поможет лучше запомнить как старое, так и новое, углубит понимание того и другого, так как при этом устанавливаются связи нового со старым, что является не только обязательным, но и основным условием глубокого овладения материалом. Чем детальнее изучаемое ассоциируется с известным ранее, тем прочнее сохраняется в памяти и быстрее вспомнится, когда требуется.

Следует помнить, что через лекцию передается не только систематизированный теоретический материал, но и постигается методика научного исследования и умение самостоятельно работать, анализировать различного рода явления.

Записывать на лекции необходимо главное, не стремясь зафиксировать все слово в слово. Выбрать же главное без понимания предмета невозможно. Наличие собственного конспекта лекций позволяет еще раз ознакомиться, продумать, разобраться в новом материале, так как недостаточно хорошо понятые во время лекции положения могут быть восстановлены в памяти, сопоставлены с другими, додуманы, дополнены, уяснены и расширены с помощью учебной литературы. Записи являются пособиями для повторения, дают возможность охватить содержание лекции и всего курса в целом.

При этом хорошо овладеть содержанием лекции – это:

- знать тему;
  - понимать значение и важность ее в данном курсе;
  - четко представлять план;
  - уметь выделить основное, главное;
  - усвоить значение примеров и иллюстраций;
  - связать вновь полученные сведения о предмете или явлении с уже имеющимися;
  - представлять возможность и необходимость применения полученных сведений.
- Существует несколько общих правил работы на лекции:
- лекции по каждому предмету записывать удобнее в отдельных тетрадях, оставляя широкие поля для пометок;
  - к прослушиванию лекций следует готовиться, что позволит в процессе лекции отделить главное от второстепенного;
  - лекции необходимо записывать с самого начала, так как оно часто бывает ключом ко всей теме;
  - так как дословно записать лекцию невозможно, то необходимо в конспекте отражать: формулы, определения, схемы, трудные места, мысли, примеры, факты и положения от которых зависит понимание главного, новое и незнакомое, неопубликованные данные, материал отсутствующий в учебниках и т.п.;
  - записывать надо сжато;
  - во время лекции важно непрерывно сохранять рабочую установку, умственную активность.

Самостоятельная работа студентов наряду с аудиторной представляет одну из форм учебного процесса и является существенной ее частью. Самостоятельная работа предназначена для формирования навыков самостоятельной работы как вообще, так и в учебной, научной деятельности. Она обеспечивает формирование и развитие способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решать проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т.д.

Самостоятельная работа формирует самостоятельность не только как совокупность умений и навыков, но и как черту характера, играющую существенную роль в структуре личности современного специалиста высшей квалификации. Она воспитывает самостоятельность как черту характера. Никакие знания, полученные на уровне пассивного восприятия, не ставшие объектом собственной умственной или практической работы, не могут считаться подлинным достоянием человека.

Давая возможность расширять и обогащать знания, умения по индивидуальным направлениям, самостоятельная работа студента позволяет создать разносторонних специалистов. В процессе самостоятельной работы развивают творческие возможности обучающегося, при этом самостоятельная работа завершает задачи всех видов учебной работы.

Самостоятельная работа - это планируемая работа студентов, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Преподаватель, ведущий занятия, организует, направляет самостоятельную работу студентов и оказывает им необходимую помощь. Однако самостоятельность студентов должна превышать объем работы, контролируемой преподавателем работы, и иметь в своей основе индивидуальную мотивацию обучающегося по получению знаний, необходимых и достаточных для будущей профессиональной деятельности в избранной сфере. Преподаватель при необходимости может оказывать содействие в выработке и коррекции данной мотивации, лежащей в основе построения самостоятельной деятельности студента по изучению дисциплины, получению необходимых знаний и навыков.

Основой самостоятельной работы служит научно-теоретический курс, комплекс полученных студентом знаний. Основной, наиболее экономичной формой получения и усвоения информации, теоретических знаний в вузе является лекция, позволяющая воспринять значительную сумму основных знаний и потому способствующая повышению продуктивности всех других форм учебного труда.

Результат обучения и самостоятельной работы студента предполагает наличие следующих составляющих: понимание методологических основ построения изучаемых знаний; выделение главных структур учебного курса; формирование средств выражения в данной области; построение методик решения задач и ориентации в проблемах (ситуациях).

Самостоятельная работа студента при изучении курса «Радиационная стойкость интегральной элементной базы» включает в себя: подготовку и участие в изучении теоретической части курса, подготовку к лабораторным работам, подготовку к зачету.

Самостоятельная работа студента при изучении дисциплины «Радиационная стойкость интегральной элементной базы» включает в себя:

изучение теоретической части курса	- 12 часов;
подготовка к лабораторным занятиям	- 12 часов;
подготовка к зачету	- 20 часов;
Итого - 44 часов.	

## 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов Интернет, необходимых для освоения дисциплины:

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Физическое материаловедение. Учебник для вузов. В шести томах Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование .— Москва : МИФИ, 2008 .— 696 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=237980">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=237980</a>
2	Дегтяренко Н.Н. Свойства дефектов и их ансамблей, радиационная физика твердого тела / Н.Н. Дегтяренко .— Москва : МИФИ, 2011 .— 199 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=232075">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=232075</a>

## б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
3	Патрикеев Л.Н. Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и интегральных схем / Л.Н. Патрикеев, Б.И. Подлепецкий, В.Д. Попов. — М., 1975. — 127 с.
4	Устюжанинов В. Н. Радиационные эффекты в биполярных интегральных микросхемах / В. Н. Устюжанинов, А. З. Чепиженко. — М. : Радио и связь, 1989. — 142 с.
5	Никифоров А. Ю. Радиационные эффекты в КМОП ИС / А.Ю.Никифоров, В.А.Телец, А.И.Чумаков. — М. : Радио и связь, 1994. — 164 с.
6	Агаханян Т. М. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах / Т. М. Агаханян, Е. Р. Аствацатурьян, П. К. Скоробогатов ; Под ред. Т. М. Агаханяна. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 252 с.
7	Коршунов Ф. П. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах / Ф.П. Коршунов, Г.В. Гатальский, Г.М. Иванов. — Минск : Наука и техника, 1978. — 231 с.
8	Першенков В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 255 с.
9	Артамонов А.С. Радиационные эффекты в БИС ОЗУ при воздействии импульсного ионизирующего излучения на моделирующей установке АРСА. Лабораторная работа / А.С. Артамонов ; Согоян А. В. ; Яненко А. В. — Москва : МИФИ, 2008. — 48 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=231554">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=231554</a>

## в) информационные электронно-образовательные ресурсы:

№ п/п	Источник
10	<a href="http://www.lib.vsu.ru">http://www.lib.vsu.ru</a> – ЗНБ ВГУ
11	Geant4 official site <URL: <a href="http://geant4.cern.ch/">http://geant4.cern.ch/</a> >

**16. Учебно-методическое обеспечение для организации самостоятельной работы:**

№ п/п	Источник
1	Языки проектирования схем смешанного сигнала : учебно-методическое пособие / [Е.В. Богатиков, А.Н. Шебанов, А.В. Злобин, С.В. Тарасов] ; Воронежский государственный университет. – Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2022. – 36 с.

**17. Информационные технологии, используемые для реализации учебного процесса по дисциплине:**

№ п/п	Источник
1	<a href="http://www.lib.vsu.ru">http://www.lib.vsu.ru</a> – ЗНБ ВГУ
2	<a href="https://edu.vsu.ru">https://edu.vsu.ru</a> – Образовательный портал "Электронный университет ВГУ"
3	Федеральный портал «Российское образование» <a href="http://www.edu.ru">http://www.edu.ru</a>

**18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

Лекционные занятия проводятся в мультимедийном кабинете кафедры ФППиМЭ, оснащённым стационарным мультимедийным проектором AcerX125H – 1 шт., ноутбук emachines e510 – 1 шт., экран, с лицензионным программным обеспечением Microsoft Windows 7, Windows 10 договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019; ПО Kaspersky Endpoint Security, договор 3010-07/04-20 от 27.01.2020.

Для проведения лабораторных работ необходим компьютерный класс с лицензионным программным обеспечением - лаборатория вычислительных систем и математического моделирования, оснащенная сервером на базе 2-х процессоров Xeon E5-2620 v3. – 1 шт., компьютеры HP ProDesk 400 G6 SFF – 9 шт., компьютеры Pentium Dual Core - 2 шт. , подключенные к сети Интернет с обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ВГУ и с лицензионным программным обеспечением: Microsoft Windows 7, Windows 10 договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019; программный комплекс для ЭВМ – MathWorks Total Academic Headcount, Университетская лицензия, договор 3010-07/01-19 от 09.01.19; ПО Kaspersky Endpoint Security, договор 3010-07/04-20 от 27.01.2020.

Аудитория для самостоятельной работы студентов оснащена сервером на базе 2-х процессоров Xeon E5-2620 v3. – 1 шт., компьютеры HP ProDesk 400 G6 SFF – 9 шт., компьютеры Pentium Dual Core - 2 шт. , подключенные к сети Интернет с обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ВГУ и лицензионным программным обеспечением: Microsoft Windows 7, Windows 10, договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019; ПО Kaspersky Endpoint Security, договор 3010-07/04-20 от 27.01.2020.

Реализация дисциплины с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий осуществляется через образовательный портал "Электронный университет ВГУ".

## 19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Компетенция	Индикаторы достижения компетенции	Оценочные средства
1	Введение	ПК-1	ПК-1.2	Вопросы к зачету
2	Радиационные эффекты в интегральных схемах	ПК-1	ПК-1.2	Вопросы к зачету
3	Технологические решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	ПК-2	ПК-2.4	Вопросы к зачету
4	Схемотехнические и программные решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	ПК-2	ПК-2.4	Отчеты о выполнении лабораторных работ №1,2
5	Топологические решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем	ПК-2	ПК-2.4	Отчеты о выполнении лабораторных работ №3,4
6	Моделирование радиационных эффектов в интегральных схемах	ПК-1	ПК-1.2	Отчеты о выполнении лабораторных работ №5,6
7	Методы испытания радиационной стойкости интегральных схем	ПК-2	ПК-2.4	Вопросы к зачету
Промежуточная аттестация: форма контроля - экзамен				Вопросы к зачету

## 20 Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания



## 20.1 Текущий контроль успеваемости

Текущий контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью оценки отчетов о выполнении лабораторных работ.

Перечень лабораторных работ

Работа № 1. Схемотехническое моделирование КМОП-инвертора с повышенной радиационной стойкостью.

Работа № 2. Схемотехническое моделирование DICE-защелки

Работа № 3. Знакомство с САПР проектирования топологии ИС

Работа № 4. Топологическое проектирование МОПТ, обладающих повышенной радиационной стойкостью

Работа № 5. Разработка HDL-модели импульса ионизационного тока.

Работа № 6. Схемотехническое моделирование DICE-защелки при воздействии импульса ионизационного тока.

## 20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине – *зачет*. Оценка за освоение дисциплины определяется ведущим дисциплину преподавателем как экспертом.

### Перечень вопросов к зачету

1. Классификация видов радиационного воздействия на ИС.
2. Применение DICE-защелок для повышения радиационной стойкости ИС.
3. Влияние накопления заряда в подзатворном диэлектрике на работу ИС.
4. Метод тройного резервирования в повышении радиационной стойкости ИС.
5. Возникновение фототока при радиационном воздействии.
6. Использование структур задержки для повышения радиационной стойкости ИС.
7. Повреждение линий питания в ИС при радиационном воздействии.
8. Методы испытаний ИС на радиационную стойкость.
9. Защелкивание транзисторов при радиационном воздействии.
10. Топологические решения для повышения радиационной стойкости МОП-транзисторов.
11. Случайные сбои переключения при радиационном воздействии.
12. Радиационная стойкость устройств, реализованных по БиКМОП технологии.
13. Радиационная стойкость устройств, реализованных по технологии КНИ КМОП.
14. Радиационная стойкость устройств, реализованных с использованием Triple-well процесса.
15. Повышение радиационной стойкости ИС при использовании охранных колец.
16. Технология изготовления радиационно-защитных корпусов ИС.
17. Использование кодов обнаружения ошибок для повышения радиационной стойкости цифровых ИС.
18. Использование кодов исправления ошибок для повышения радиационной стойкости цифровых ИС.
19. Использование языков проектирования аппаратуры для схем смешанного сигнала.
20. Программные пакеты моделирования взаимодействия радиации с веществом.

Для текущего контроля успеваемости используется устный опрос, отчеты о ходе выполнения практических работ.

Каждому обучающемуся задаются вопросы по всем разделам спецкурса.

Оценка освоения компетенций обучающимися во время прохождения спецкурса осуществляется по следующим критериям:

- уровень профессиональной подготовки;
- ответы на контрольные вопросы.

Уровень профессионализма (профессиональные знания, умения, навыки и компетенции) оценивается по следующим показателям:

- умение формулировать цели исследований;
- адекватное применение физико-математического аппарата для решения поставленных задач;
- адекватная рефлексия выполняемой научно-практической деятельности.

На основании выполнения обучающимся программы спецкурса и с учетом критериев оценки итогов освоения спецкурса выставляется: *«зачтено»/«не зачтено»*.

Критерии оценки работы обучающихся, которые соотносятся с уровнями сформированности компетенций:

- оценка *«зачтено»* выставляется при полном соответствии работы обучающихся всем вышеуказанным показателям: компетенции сформированы полностью, проявляются и используются систематически и в полном объеме. Данный уровень обязателен для всех осваивающих ООП;
- оценка *«не зачтено»* выставляется в случае несоответствия работы обучающегося всем требуемым показателям, неорганизованности, безответственности и низкого качества работы при выполнении заданий, предусмотренных программой спецкурса.