

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра общей и технической физики

ОБЩАЯ ФИЗИКА  
**ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

Поляриметрический метод исследования  
оптически активных сред

*Методические указания к лабораторной работе*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2018

Физика. **ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СРЕД:** Методические указания к лабораторной работе / А.С. Мустафаев, А.Ю. Грабовский. САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ. СПб, 2018. 13 с.

В методических указаниях к лабораторной работе «ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СРЕД» сформулированы: теория, описание техники эксперимента, алгоритм выполнения работы и обработки экспериментальных данных.

Лабораторная работа дает возможность студентам познакомиться с явлением оптической активности, освоить методику определения концентрации оптически активных растворов, а также изучить физические принципы работы и устройство современных поляриметров. Основная задача - овладеть техникой и методикой проведения эксперимента, а также приемами обработки его результатов и оформления заключительного отчета.

В зачетной работе практикума студент должен продемонстрировать умение в устной и письменной форме, логически верно и аргументировано защищать результаты своих исследований.

Методические указания к лабораторной работе предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата и магистратуры Санкт-Петербургского горного университета.

Научный редактор проф. *А.С. Мустафаев*  
Рецензент заведующий кафедрой оптики физического факультета СПбГУ,  
проф. *Н.А. Тимофеев*

© Санкт-Петербургский горный университет,  
2018 г.

# ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СРЕД

## Цель работы

Экспериментально исследовать явление оптической активности сахарного раствора: определить угол поворота плоскости поляризации монохроматического света, удельное вращение и концентрацию раствора.

## Теоретические сведения

Видимый свет представляет собой электромагнитные волны с длинами от  $4 \cdot 10^{-7}$  м до  $7 \cdot 10^{-7}$  м. В электромагнитной волне векторы напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и магнитного поля  $\vec{H}$  взаимно перпендикулярны и одновременно перпендикулярны направлению распространения волны  $\vec{r}$  (рис. 1). Плоскость, проведенную через направления  $\vec{E}$  и  $\vec{r}$ , называют плоскостью колебаний электрического вектора.

Для полной характеристики волны задают ее длину  $\lambda$ , модули векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  а также ориентацию в пространстве плоскости колебаний электрического вектора. Если для некоторого пучка света плоскость колебаний электрического вектора не изменяет положение в пространстве, то такой свет называют линейно-поляризованным.

Естественный или неполяризованный свет можно рассматривать как наложение многих электромагнитных волн, распространяющихся в одном и том же направлении, но со всевозможными ориентациями плоскостей колебаний. Таким образом, для неполяризованного света нельзя указать даже плоскость преимущественного расположения вектора  $\vec{E}$ . Все его ориентации равновероятны. Если же имеется какое-либо преимущественное направление ориентации векто-

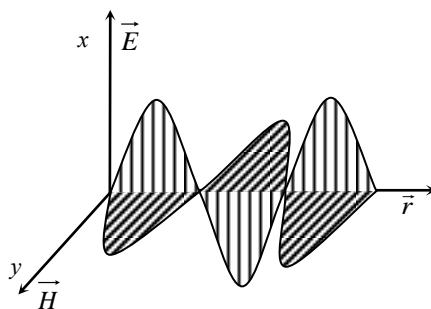


Рис. 1

ра  $\vec{E}$ , то световой пучок называют частично-поляризованным.

Если в световом пучке вектор  $\vec{E}$  имеет составляющие как по оси  $x$ , так и по оси  $y$ , причем  $E_x = E_0 \cos \omega t$  и  $E_y = E_0 \cos(\omega t + \pi/2)$ , где  $\omega$  – частота световой волны, то в каждый момент времени  $t$  эти составляющие складываются. Результирующий вектор, оставаясь постоянным по величине, вращается с частотой  $\omega$ , а его конец описывает окружность. В этом случае говорят, что свет имеет круговую поляризацию.

Если составляющие вектора  $\vec{E}$  по осям  $x$  и  $y$  колеблются с одинаковыми частотами, но имеют либо разные амплитуды, либо разность фаз колебаний отличается от  $\frac{1}{2}\pi$ ,  $\frac{3}{2}\pi$ ,  $\frac{5}{2}\pi$  и т.д., то конец электрического вектора будет описывать эллипс и в этом случае говорят об эллиптической поляризации светового пучка. Таким образом, имеется пять типов поляризованного света:

- естественный или неполяризованный свет;
- частично-поляризованный свет;
- линейно- или плоско-поляризованный свет;
- свет, поляризованный по кругу (циркулярно);
- эллиптически-поляризованный свет.

Пусть на поляризатор падает линейно-поляризованное излучение интенсивностью  $I_0$  (рис. 2). Разложим вектор  $\vec{E}_0$  на две составляющие, лежащие в главной плоскости поляризатора:  $E_{\parallel} = E_0 \cos \varphi$ , и перпендикулярную составляющую  $E_{\perp} = E_0 \sin \varphi$ , где  $\varphi$  – угол между плоскостью колебаний электрического вектора, падающего на поляризатор излучения, и главной плоскостью поляризатора. Поскольку поляризатор пропускает излучение только с составляющей вектора  $\vec{E}$ , лежащей в главной плоскости, то выходящее излучение имеет интенсивность

$$I \sim \langle E_{\parallel}^2 \rangle = \langle E_0^2 \cos^2 \varphi \rangle,$$

здесь угловые скобки обозначают, усреднение по времени. Учитывая, что интенсивность падающего излучения  $I_0 \sim \langle E_0^2 \rangle$ , получим

$$I = I_0 \cos^2 \varphi. \quad (1)$$

Последнее соотношение называют законом Малюса.

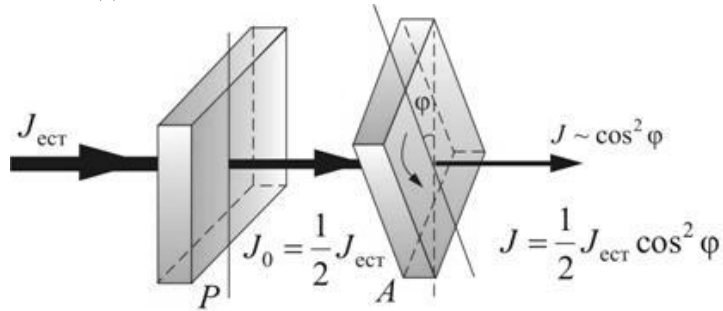


Рис. 2

Если направить на поляризатор естественное (неполяризованное) излучение, в котором все ориентации вектора напряженности равновероятны (т.е. возможны любые значения  $\varphi$ ), то проводя усреднение по углу  $\varphi$  в соотношении (1) получим  $I = 0,5 I_{\text{ест}}$ . Таким образом, при прохождении через поляризатор естественное излучение становится линейно-поляризованным, но убывает по интенсивности вдвое.

Для количественной оценки степени поляризации излучения применяется соотношение

$$P = I_{\text{п}} / I. \quad (2)$$

Частично-поляризованное излучение понимается как смесь линейно-поляризованного и неполяризованного излучений. Тогда  $I$  – полная интенсивность,  $I_{\text{п}}$  – интенсивность линейно-поляризованного компонента. Очевидно,  $I = I_{\text{п}} + I_{\text{н}}$ , где  $I_{\text{н}}$  – интенсивность неполяризованного компонента. Поскольку  $0 < I_{\text{п}} < I$ , то степень поляризации может меняться в пределах  $0 < P < 1$ .

Если направить частично-поляризованное излучение на поляризатор и вращать устройство, меняя угол между главной плоскостью поляризатора и преимущественным направлением вектора  $\vec{E}$ , то интенсивность прошедшего излучения будет меняться от максимального значения  $I_{\text{max}}$  до минимального  $I_{\text{min}}$ . В первом положении поляризованный компонент проходит полностью, а неполяризованный уменьшается по интенсивности вдвое:

$$I_{\max} = I_{\parallel} + I_{\perp} / 2. \quad (3)$$

Во втором положении, которое отличается по углу от первого на  $90^\circ$ , поляризованный компонент, согласно закону Малюса, полностью задерживается, а неполяризованный по-прежнему уменьшается вдвое:

$$I_{\min} = I_{\perp} / 2. \quad (4)$$

Складывая и вычитая уравнения (3) и (4), имеем  $I_{\parallel} = I_{\max} - I_{\min}$ ;  $I = I_{\max} + I_{\min}$ . Подставляя последние соотношения в (2) получим формулу для расчета степени поляризации:

$$P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}).$$

Таким образом, интенсивность частично-поляризованного излучения, прошедшего через поляризатор, будет определяться следующим уравнением:

$$I = \frac{1}{2} I_{\perp} + I_{\parallel} \cos^2 \varphi.$$

Используя полученные ранее соотношения для  $I_{\min}$  и  $I_{\parallel}$ , окончательно находим:

$$I = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cos^2 \varphi.$$

Отметим, что в последнее время в качестве поляризаторов все чаще используются синтетические поляроидные пленки.

При прохождении поляризованного света через некоторые вещества наблюдается интересное явление вращения плоскости колебаний вектора  $\vec{E}$  проходящего светового луча. Такие вещества называются оптически активными, и их подразделяют на два типа. Относящиеся к первому типу оптически активны в любом агрегатном состоянии (сахара, камфора, винная кислота), ко второму - только в кристаллической фазе (кварц, киноварь). У веществ первого типа оптическая активность обусловлена асимметричным строением их молекул, второго типа - специфической ориентацией молекул (ионов) в элементарных ячейках кристалла (асимметрией поля сил, связывающих частицы в кристаллической решётке).

Если между скрещенными поляризатором и анализатором (когда свет через такую систему не проходит) поместить оптически

активное вещество, то плоскость поляризации света, вышедшего из поляризатора, повернется вокруг светового луча на некоторый угол, и анализатор начнет пропускать свет. Чтобы вновь прекратить прохождение света, необходимо повернуть анализатор на угол  $\alpha$ , равный углу, на который повернулась плоскость поляризации. При прохождении поляризованного света через, например, оптически активный кристалл, угол поворота плоскости поляризации  $\alpha$  пропорционален толщине кристалла  $\ell$ . При прохождении через оптически активный раствор,  $\alpha$  пропорционален длине пути луча  $\ell$  и концентрации раствора  $c$ . Таким образом, для кристалла и раствора  $\alpha$  выражается соотношениями

$$\alpha_k = \rho' \ell,$$

$$\alpha_p = \rho'' \ell c,$$

где  $\rho'$  и  $\rho''$  – удельное вращение для кристалла и раствора соответственно.

Удельное вращение для раствора  $\rho''$  численно равно углу поворота плоскости поляризации при длине пути в 1 м и единичной концентрации активного раствора. Удельное вращение зависит от рода активного вещества и длины волны проходящего света.

#### **Описание экспериментальной установки**

Концентрация раствора сахара определяется прибором, который называется поляриметром (рис. 3), в котором применен принцип уравнивания яркостей разделенного на три части наблюдаемого светового поля. Основными элементами поляриметра являются поляризационное устройство, анализатор и трубка с раствором сахара, помещенная между ними. Анализатор изготовлен из поляроидной пленки, заклеенной между двумя защитными стеклами. Поляризационное устройство состоит из призмы-поляризатора, конденсора и хроматической фазовой кварцевой пластинки, расположенной симметрично относительно призмы-поляризатора.

Схема поляриметра представлена на рис. 4: монохроматический свет ( $\lambda=589$  нм), испускаемый светодиодной лампой 1, пройдя через конденсор 2 и призму-поляризатор 3, средней частью пучка

проходит через хроматическую фазовую кварцевую пластинку 4, а двумя крайними частями пучка только через анализатор 6. Таким образом, поворот плоскости поляризации на небольшой угол (примерно  $4,5^\circ$ ) происходит только в центральной части пучка. В результате при наблюдении через окуляр поляриметра можно видеть световое поле, разделенное на три части: центральную, имеющую одну освещенность, и две части, расположенные справа и слева от центральной, освещенные иначе (рис. 5, б, в).

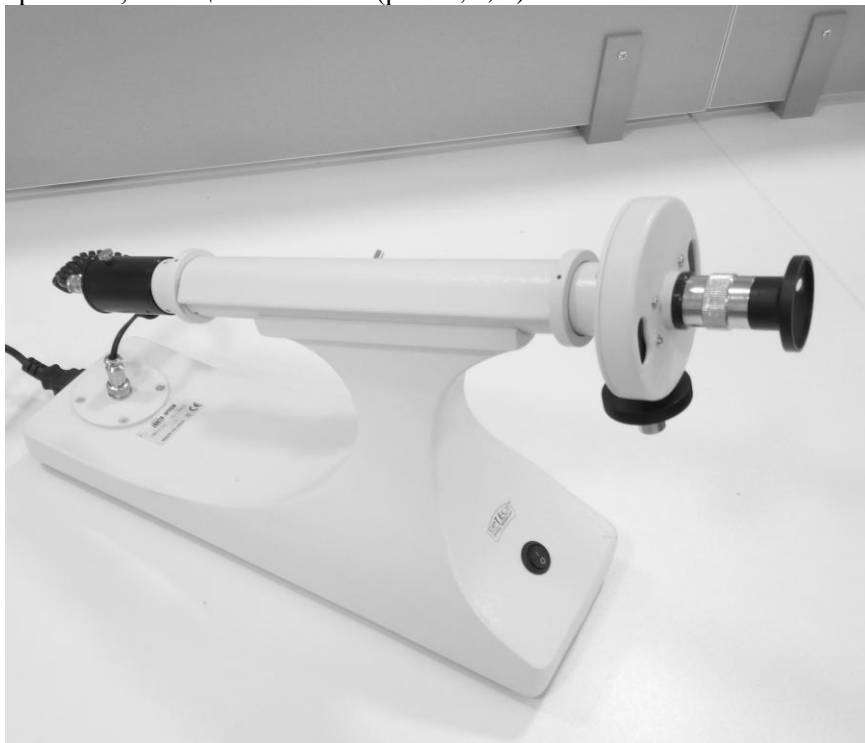


Рис. 3

При прохождении лучей через анализатор все три области освещены одинаково (рис. 5, а) только в том случае, если плоскость пропускания анализатора составляет одинаковые углы с плоскостями поляризации лучей. Последнему условию удовлетворяет плоскость  $AB$  (рис. 6, а, б). Если между анализатором и поляризатором в



кюветное отделение поместить трубку с оптически активным раствором 5, то плоскости поляризации лучей повернутся на некоторый угол  $\alpha$  (рис. 6, в), и равенство освещенностей трех областей нарушится (рис. 5, б, в).

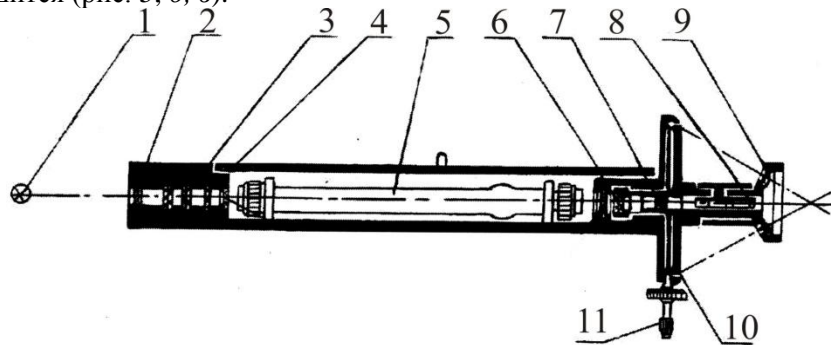


Рис. 4

Поворотом анализатора на угол, равный углу  $\alpha$  поворота плоскости поляризации раствором можно восстановить равенство освещенностей. Анализатор жестко связан с измерительной шкалой прибора 10 и приводится во вращение винтом 11. Таким образом, можно легко определить угол поворота анализатора, а значит, и плоскости поляризации.

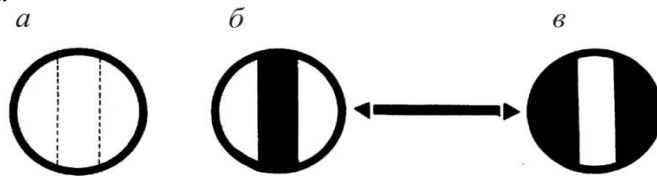


Рис. 5 а, б, в

Зрительная труба 8 служит для наблюдения тройного поля и состоит из объектива и окуляра. Вращением муфты, расположенной на корпусе объектива, производится фокусировка наблюдаемого изображения. В раковине окуляра находится две лупы 9, которые позволяют наблюдателю, не меняя своего положения, отсчитывать угол вращения плоскости поляризации по измерительной шкале.

Измерительная шкала (рис. 7) состоит из двух половин – лимба и нониуса. На лимбе по часовой стрелке нанесена основная

градусная шкала с ценой деления  $1^\circ$ , полный оборот которой составляет  $360^\circ$ .

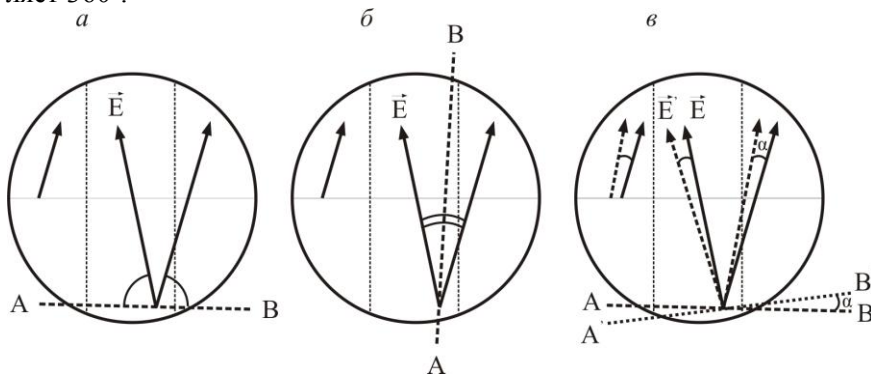


Рис. 6 а, б, в

Внутри лимба на подвижной втулке, связанной с анализатором, нанесены два нониуса, расположенные диаметрально. Нониусы имеют по 20 делений (цена деления шкалы нониусов составляет  $0,05^\circ$ ).

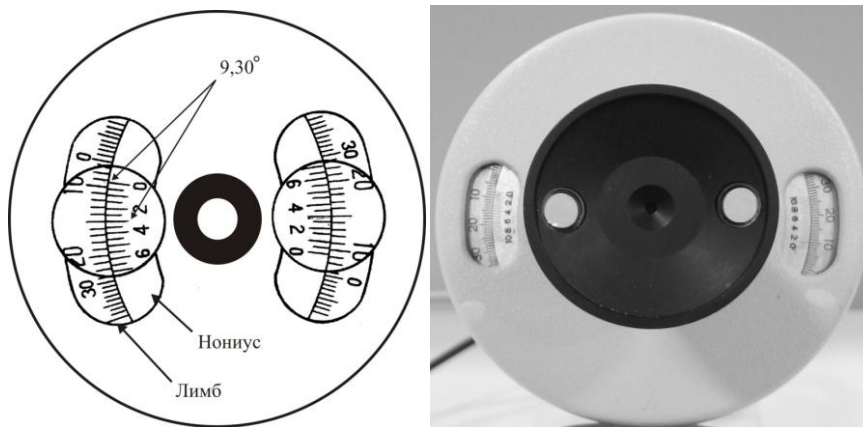


Рис. 7

Показание лимба, приходящееся против нулевого деления нониуса, дает **число градусов**. Десятые доли градуса определяются по шкале

нониуса напротив штриха, совпадающего со штрихом лимба. Таким образом, на рис. 7 отсчет составляет  $9,30^0$ .

### Порядок выполнения работы

#### **Определение удельного вращения раствора с известной концентрацией:**

1) убедиться, что в прибор не вставлена трубка с сахарным раствором;

2) глядя в окуляр поляриметра, получить четкое изображение тройного светового поля (рис. 5). Для этого необходимо произвести фокусировку изображения с помощью муфты на корпусе объектива;

3) вращая анализатор, уравнивать освещенности всех трех областей светового поля зрения (рис. 5, а) так, чтобы малейший поворот рукоятки винта вызывал резкую смену соотношения освещенностей областей;

4) снять нулевой отсчет  $\alpha_0$  по измерительной шкале; повторить измерения три раза и определить среднее значение  $\bar{\alpha}_0$ ;

5) поместить в поляриметр трубку с раствором сахара известной концентрации и закрыть шторку. Произвести фокусировку, и вновь уравнивать освещенность трех частей светового поля аналогично пп. 3. Три раза измерить угол  $\alpha_1$ , соответствующий равенству освещенностей;

б) вычислить удельное вращение по формуле

$$\rho'' = \alpha / (\ell_1 C),$$

где  $\alpha = \alpha_1 - \bar{\alpha}_0$ ; значения  $\ell_1$  и  $C$  указаны на трубке;

7) записать результаты измерений и вычислений в табл. 1.

#### **Определение концентрации сахарного раствора:**

1) поместить в поляриметр трубку с раствором сахара, концентрацию которого надо определить, повторить измерения, описанные выше, записать значение  $\alpha_2$ ;

2) вычислить угол поворота для исследуемого раствора  
 $\alpha_x = \alpha_2 - \bar{\alpha}_0$ ;

3) подставив полученные значения в формулу

$$C_x = \alpha_x / (\rho'' l_2),$$

(здесь  $l_2$  – длина трубки с раствором неизвестной концентрации)  
 определить концентрацию сахара в растворе;

4) записать результаты измерений и вычислений в табл. 2;

5) вычислить погрешность определения концентрации сахара  
 в растворе.

Таблица 1

Номер опыта	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha = \alpha_1 - \bar{\alpha}_0$	$\rho''$
1.				
2.				
3.				
Среднее		–	–	

Таблица 2

Номер опыта	$\alpha_0$	$\alpha_2$	$\alpha_x = \alpha_2 - \bar{\alpha}_0$	$C_x = \frac{\alpha_x}{\rho'' l_2}$
1.				
2.				
3.				
Среднее		–	–	

### Контрольные вопросы

1. Какой свет называется поляризованным? В чем его отличие от естественного света?

2. В чем состоит закон Малюса?

3. В чем заключается явление вращения плоскости поляризации?

4. Какие вещества называют оптически активными? Приведите примеры.
5. Каково строение оптически активных веществ?
6. Что такое удельное вращение плоскости поляризации?
7. Как можно измерить угол поворота плоскости поляризации с помощью двух поляризаторов?
8. Что понимают под концентрацией раствора?
9. Опишите принципиальную оптическую схему поляриметра.
10. Почему теневые поляриметры менее предпочтительны, чем поляриметры, устанавливаемые на равенство освещенностей двух или трех полей зрения?
11. Как экспериментально устанавливается нулевой отсчет на шкале поляриметра?

#### **Рекомендательный библиографический список**

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. СПб, М.: Лань, 2009. Т.2-3. 10-е изд.
2. *Фриш С.Э.* Курс общей физики. / *Фриш С.Э., Тиморева А.В.* СПб, М.: Лань, 2009. Т.2-3. 10-е изд.
3. *Яворский Б.М.* Справочник по физике / *Б.М.Яворский, А.А.Детлаф.* М.: ОНИКС, Мир и Образование, 2008, 8-е изд.
4. *Калитеевский Н.И.* *Волновая оптика.* СПб.: «Лань», 2006. - 480 с.

#### **СОДЕРЖАНИЕ**

Цель работы.....	3
Теоретические сведения.....	3
Описание экспериментальной установки.....	7
Порядок выполнения работы.....	11
Контрольные вопросы.....	12
Рекомендательный библиографический список.....	13