

А. П. КЛИЩЕНКО, А. Н. КРАСОВСКИЙ, В. В. СИКОРСКИЙ,
Г. Ф. СТЕЛЬМАХ, В. И. ШУПЛЯК.

СПЕКТРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В ГЕОЭКОИНФОРМАТИКЕ

Актуальность и общность научных и практических задач, связанных с рациональным использованием природных ресурсов, изучением и освоением крупных регионов Земли, исследованием процессов взаимного влияния атмосферы, суши и океана послужили основой для объединения широкого круга естественных наук в специальную отрасль – геоэкоинформатику. Одним из важнейших направлений геоэкоинформатики сегодня является развитие экологического мониторинга, включающего создание аппаратуры и методов диагностики и анализа состояния объектов природной среды. Для плодотворного решения этих задач требуется не только реализация научно-технических исследований и методических разработок, но и подготовка соответствующих специалистов, способных планировать и осуществлять сбор обширной, многопараметрической информации, разрабатывать методики ее анализа и практического использования.

Одним из эффективных направлений диагностики природных объектов является пассивное *оптическое дистанционное зондирование* (ОДЗ) Земли. В СССР (в частности, в Беларуси) разработка методов и создание аппаратуры для ОДЗ осуществлялись по инициативе академика АН БССР А. И. Киселевского [1]. По сравнению с традиционными «контактными» методами получения информации ОДЗ открывает уникальные возможности оперативного сбора данных в глобальном масштабе с высоким спектральным, временным и пространственным разрешением. В настоящее время использование наземных платформ, космических и аэроносителей диагностической аппаратуры (включая оптические приборы), средств обработки, хранения и передачи информации, математических и физических методов ее анализа и интерпретации их результатов привело к созданию и интенсивному развитию глобальных *геоэкоинформационных систем* (ГЭИС). Современный этап характеризуется также необходимостью углубления фундаментальных исследований в области изучения растительных объектов, почв, океана и атмосферы Земли.

Физическая сущность методов ОДЗ сводится к анализу закономерностей переноса и взаимодействия электромагнитного излучения с веществом [2]. Формально описание энергетических параметров оптического излучения в некоторой точке (области) светового поля (яркость, освещенность, параметры Стокса и т. п.) проводится на базе эмпирических законов «фотополяриметрии» в рамках лучевой (геометрической) оптики [3]. Система фотометрических представлений и величин, по сути, порождается реакцией измерительного устройства (квадратичным откликом, конечностью его размеров и постоянной времени) на воздействие поля излучения, которая может быть математически выражена оператором этого воздействия.

Такой подход позволяет отчетливо отделить характеристики поля излучения (до и после воздействия на вещество) от характеристик самого вещества (в том числе – оптического прибора), свойства которого исчерпывающе описываются оператором, независимым от состояния последнего. Таким образом, исследование свойств объектов в рамках так называемой обратной спектроскопической задачи сводится к интерпретации экспериментально определяемого оператора воздействия вещества (объекта) на световой луч [2, 3]. Однако для ее решения надо иметь градуированную аппаратуру с детерминированными оптическими и информационными свойствами элементов оптики, детектора и блока обработки сигнала приемника.

ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Фотометрическое обеспечение оптической диагностики является необходимым условием получения однозначных и корректных результатов как при проведении экспериментальных исследований, так и при теоретических разработках. И в теории многократного рассеяния, и в теории переноса излучения при решении прямых и обратных задач ОДЗ используются оптические характеристики объектов и оптические параметры аппаратуры. Задача фотометрического обеспечения ОДЗ, кроме метрологической поверки и калибровки конкретных приборов, включает всесторонний анализ процесса натуральных оптических измерений с точки зрения их физической корректности, выработку оптимальной процедуры эксперимента, выбор необходимых измеряемых параметров, согласование последних с возможностями аппаратуры.

На кафедре атомной физики и физической информатики Белгосуниверситета ведется систематическая работа по фотометрическому обеспечению ОДЗ в видимом и УФ диапазонах излучения. Результаты научно-исследовательских разработок в данной области нашли применение в различных организациях, проводящих геофизические и экологические исследования (российские Институт физики атмосферы, КБ им. С. И. Лавочкина, ЦНИИ «Комета», белорусские РНТЦ «Экомир», ННИЦ мониторинга озоносферы и др.), а также явились основой ряда методических, научных и прикладных работ [4–14, 16–25].

Высокоточная калибровка фотометрических приборов, предназначенных для измерения абсолютных энергетических величин, возможна лишь при выполнении «идеальных» условий, когда: а) фотоприемный прибор обладает чувствительностью, постоянной по спектру, равномерной по углу наблюдения и линейной в энергетических величинах, охватывающих режимы измерения и калибровки; эти параметры должны совпадать с характеристиками стандартизованного эталонного фотоприемника; б) стандартный источник, используемый при калибровке, имеет такое же спектральное и пространственно-угловое распределение излучения, как и исследуемый объект. В этом случае погрешность калибровки фотометра определяется лишь погрешностями абсолютной энергетической калибровки эталонного источника (приемника) и стабильностью фоточувствительности прибора. Поскольку одновременное выполнение всех вышеперечисленных требований невозможно, в процессе калибровки необходимо вводить коррекцию на отклонение характеристик от «идеальности», при этом точность калибровки снижается. Следует также отметить, что погрешности эталонирования стандартизованных источников и приемников излучения для ультрафиолетовой области существенно (примерно

на порядок) превышают погрешности для видимой области спектра. Поэтому при разработке методов и аппаратуры дистанционной фотометрии предпочтение отдается методам, использующим измерения относительных характеристик оптического излучения, что позволяет существенно повысить точность как фотометрической калибровки аппаратуры, так и самих измерений. К примеру, динамические процессы в атмосфере исследуются по изменениям спектра прошедшего (рассеянного) солнечного излучения во времени; статические – по пространственному изменению спектральных характеристик; в озонметрии используется измерение отношений световых потоков, регистрируемых в различных спектральных участках (на различных длинах волн); при оптическом дистанционном зондировании земной поверхности чаще измеряется спектральный коэффициент яркости.

Методика калибровки аппаратуры дистанционной фотометрии разрабатывается, исходя из требуемых для определения параметров: фотометрических величин, спектрального диапазона, диапазона мощностей (энергий) излучения, геометрических характеристик измеряемого излучения, точности измерения. Создание единой и «универсальной» и одновременно надежной методики калибровки без учета конкретных условий измерения практически невозможно в силу многообразия вышеперечисленных параметров. Тем не менее конкретная методика калибровки должна основываться на общих законах фотометрии и, как правило, разрабатываться на базе стандартных методик (ГОСТы, ОСТы, МИ, методики национальных бюро стандартов и др.) с использованием стандартизованных источников или приемников излучения.

При разработке методик фотометрической калибровки следует в максимальной мере использовать следующие принципы [6]:

А. *Принцип подобия.* Наивысшая точность и надежность калибровки достигается при минимальном отличии процедуры калибровки от процедуры измерений и минимальном различии характеристик измеряемого и эталонного излучений.

Б. *Принцип минимального возмущения.* Калибровку (поверку) какой-либо характеристики фотометрической системы следует производить при минимально возможных изменениях параметров фотометрической системы и эталонного излучения. Например, калибровка спектральной чувствительности спектрометра (фотометра) производится изменением длины волны монохроматора спектрометра (источника излучения), оставляя неизменными геометрические параметры излучения, угол зрения оптической системы, абсолютную фоточувствительность фотоприемной системы. Вместе с тем этот принцип, являющийся одним из основных в обеспечении максимально надежной калибровки, нельзя абсолютизировать. В ряде случаев повышению надежности способствует введение «дополнительного известного возмущения». Например, при измерениях угловой или спектральной чувствительности бывает целесообразно уменьшить (увеличить) интенсивность излучения известным образом, лишь бы не выйти за пределы области линейной фоточувствительности прибора.

В. *Принцип приоритета и циклической последовательности калибруемых параметров.* Вначале проверяются те характеристики фотометрической системы, которые в наибольшей степени влияют на точность измерений; при анализе последующих характеристик необходимо удостовериться в правильности калибровки уже поверенных характеристик. Например, измерение спектральной чувствительности целесообразно проводить после того, как определена область линейной фоточувст-

вительности. Но если окажется, что проверка линейности была проведена с использованием источника излучения со спектром, не коррелирующим с областью спектральной чувствительности фотометра, то линейность следует перепроверить, используя излучение со спектром, соответствующим рабочей спектральной области прибора.

Приведем примеры использования наших разработок в области фотометрического обеспечения для целей геоэкоинформатики: применение ультрафиолетовых интерференционных фильтров с крайне низким фоновым пропусканием для целей озониметрии [9–11, 13], создание люминесцентного стандарта для измерений концентрации хлорофилла природных объектов [14], корректное использование спектрополяриметра-гониометра (СПГ) при измерении индикатрис рассеяния света листом растения [6, 16].

Нами рассмотрены перспективы использования и возможности практической реализации высокоорбитальной ультрафиолетовой телевизионной системы для глобального оперативного мониторинга озона [10, 11]. Основная идея разработки заключается в корреляции флуктуаций поля яркости, наблюдаемых в узких спектральных интервалах УФ области спектра, с аномалиями в распределении атмосферного озона. Не претендуя на точность существующих в настоящее время методов орбитального контроля озоносферы, предлагаемая методика дает более высокое временное и пространственное разрешение и позволяет контролировать в реальном масштабе времени динамику атмосферного озона над всей областью земной поверхности, видимой с борта космического корабля.

Данная разработка была испытана в экспериментах с ультрафиолетовой ТВ камерой на борту орбитальной станции «Мир». Анализ результатов проведенных космических экспериментов показал, что для повышения точности и надежности УФ измерений озона требуется доработка аппаратуры. Совершенствование аппаратуры заключается в использовании солнечно-слепого микроканального преобразователя УФ изображения в сочетании с системой переключаемых входных интерференционных фильтров, имеющих полосы пропускания шириной около 5 нм в спектральной области 285–340 нм и очень низкое фоновое пропускание вне пределов основной полосы.

Для измерения спектральных характеристик интерференционных фильтров была создана спектрометрическая установка [7, 9], позволяющая измерять спектры пропускания в области 200–800 нм в диапазоне пропускания от 100 до $5 \times 10^{-5} \%$. В определенной степени созданная установка является оптическим аналогом высокоточного однолучевого спектрофотометра сравнения, разработанного в отделении физики национального исследовательского совета Канады [15]. Основным ее отличием является возможность измерять очень низкие уровни пропускания (от 0,01 до $5 \times 10^{-5} \%$). Спектрометрическая установка создана на базе спектрального комплекса КСВУ-6 и работает по однолучевой схеме, что позволяет более четко выделять и исключать различные систематические ошибки [15].

Для измерения очень малых пропусканий создана система контролируемой регулировки чувствительности, состоящая из четырех независимых контролирующих и дополняющих друг друга подсистем: а) ослабление входного пучка калиброванными ослабителями (черненные металлические сетки); б) калиброванное регулирование потока, падающего на фотоприемник, путем контролируемого изменения ширины входной и/или выходной щели; в) калиброванное изменение чувстви-

тельности фотоумножителя путем контролируемого изменения напряжения питания; г) калиброванное изменение чувствительности фотоэлектронной системы путем контролируемого изменения выходного сопротивления. Система позволяет измерять спектр основной полосы со значениями пропускания до 100 %, крылья и «паразитные» полосы – в пределах 0,001–1,0 %, уровень фонового пропускания – менее 5×10^{-5} %.

Проведенные исследования [10, 11] позволили подобрать интерференционные фильтры с низким фоновым пропусканием. Путем математического моделирования процесса измерений показано, что модифицированная ТВ аппаратура с использованием четырех УФ интерференционных фильтров способна обеспечить получение достаточной информации для глобального контроля состояния озоносферы [11].

Измерение люминесценции хлорофилла широко используется в биологических и экологических исследованиях растительных объектов [2]. Как правило, в натурных измерениях задействованы фильтровые флуориметры с возбуждением в синей области спектра и регистрацией в красной области. Для обеспечения надежности измерений и периодической калибровки флуориметров требуются надежные эталонные люминесцирующие образцы со стабильными спектрально-люминесцентными свойствами, близкими к спектрально-люминесцентным свойствам хлорофилла. Оказалось, что со спектральной точки зрения оптимальными стандартами могут быть синтетические хлорофиллоподобные соединения – порфирины. Предлагаемые стандарты, наряду со стабильностью спектрально-люминесцентных параметров, характеризуются незначительностью температурного тушения флуоресценции, отсутствием агрегации и высокой химической стабильностью в неактивных растворителях.

Практически реализован люминесцентный стандарт на основе обескислороженного раствора порфирина в силиконовом масле [14]. Данная разработка была использована для калибровки полевого флуориметра «Квант», предназначенного для измерения флуоресценции хлорофиллосодержащих водорослей и определения концентрации хлорофилла в пределах 0,1 мкг/л – 1,0 мг/л.

Для развития ОДЗ растительного покрова Земли необходима разработка методов оперативной оптической диагностики состояния листа растения, для чего требуются измерения двунаправленных коэффициентов рассеяния падающего на лист света [16]. Однако при кажущейся простоте измерений угловых распределений фотометрических параметров даже лабораторная методика экспериментальных исследований должна учитывать ряд положений, игнорирование которых приведет к значительному увеличению погрешности опытов или вообще к неверным результатам.

1. Для направленных коэффициентов отражения (ρ) и пропускания (τ) существенна не только зависимость от длины волны λ , но и от углов освещения γ и визирования β . Следовательно, для проведения физически обоснованного анализа и правильной интерпретации результатов измерение индикатрис $\rho_{\lambda, \gamma}(\beta)$ и $\tau_{\lambda, \gamma}(\beta)$ необходимо проводить при освещении объекта параллельным пучком света, для которого можно строго контролировать угол падения γ .

2. При измерении угловых распределений $\rho_{\lambda}(\gamma, \beta)$ и $\tau_{\lambda}(\gamma, \beta)$ следует корректно выбирать сечения световых пучков, которые используют при освещении (σ_0) и фотометрировании (σ_{ϕ}). При проведении измерений для листа растения (ΔP) сечение

σ_f должно при всех γ и β полностью перекрывать размеры фотометрируемой площадки σ_f .

Выполненная с учетом отмеченных выше требований градуировка СПГ позволила на протяжении ряда лет осуществить цикл корректных исследований спектрополяризационных характеристик листьев различных растений [16–25].

СПЕКТРОПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ НЕФЕЛОМЕТРИЯ СЛОЖНОКОМПОНЕНТНЫХ СТРУКТУР РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Спектроскопическое изучение процессов преобразования оптического излучения в сложнокомпонентных структурах растительного происхождения представляет интерес в первую очередь в связи с тем, что поглощение фотосинтетически активной радиации (ФАР – излучение в диапазоне 380–740 нм) обеспечивает в живых растениях деятельность фотосинтезирующего аппарата. Вместе с тем до сих пор не удавалось надежно (однозначно) разделить механизмы формирования рассеянного листом растения потока при различной геометрии освещения, а также выявить характеристичные признаки спектрополяризационных параметров рассеянного света, что необходимо для развития методов ОДЗ растительности Земли.

С целью изучения механизма формирования потока света от пластинки ЛР нами проведены лабораторные исследования угловых распределений (индикатрис) фотометрических и спектрополяризационных характеристик рассеянного/отраженного листом излучения: спектральных коэффициентов отражения $\rho_{\lambda,\gamma}(\beta)$ и пропускания $\tau_{\lambda,\gamma}(\beta)$, степени $P_{\lambda,\gamma}(\beta)$ и азимута $\Theta_{\lambda,\gamma}(\beta)$ поляризации. Методика измерений детально описана в работе [16].

В работах [16–19] в качестве объектов были выбраны три вида листьев: светлюбивой березы (ЛБ) – *Betula verrucosa*, теневыносливой липы (ЛЛ) – *Tilia cordata* и клена обыкновенного (ЛК) – *Acer platanoides*. Структурные особенности более тонких ЛК и ЛЛ связаны с меньшим содержанием механических элементов и менее плотным мезофиллом, чем у ЛБ, у которых более плотная структура, утолщенные оболочки клеток и значительно большее количество механических тканей.

Обычно измерения проводились для четырех характеристичных участков спектра: $\lambda = 460$ и 680 нм (сильное поглощение ФАР пигментами листа); $\lambda = 550$ нм (среднее поглощение) и $\lambda = 740$ нм (слабое поглощение). Распределения интенсивностей $I_{\lambda,\gamma}(\beta)$, по сути, представляют собой угловые зависимости фотометрических характеристик отражения и пропускания. Вычисляя отношения $I_{\lambda,\gamma}(\beta) : I_{\lambda,\gamma}^{\max} = f_{\lambda,\gamma}(\beta)$, можно восстановить явный вид индикатрис рассеяния: $\rho_{\lambda,\gamma}(\beta)$ – для потока от верхней плоскости листовой пластинки; $\tau_{\lambda,\gamma}(\beta)$ – для прошедшего сквозь ЛР потока света. (Обозначим поляризацию потока освещения таким образом: I_d – деполаризованный поток; $I_{\perp}$ – линейно поляризованный перпендикулярно плоскости падения (ПП) поток; $I_{\parallel}$ – линейно поляризованный параллельно ПП поток.) Наши результаты позволяют констатировать, что интенсивность прошедшего сквозь ЛР света очень сильно зависит как от оптических свойств листа, так и от условий освещения. Характер поляризации потока, которым освещали ЛР, по-разному влияет на интенсивность прошедшего через лист излучения при различных γ и β [17].

Одной из причин таких различий в прохождении сквозь лист света разной поляризации являются разные по величине френелевские коэффициенты отражения $\rho_{\parallel}$, ρ_{Δ} и $\rho_{\perp}$. Их отличие будет наибольшим при $\gamma = \beta = i_0$ (угол Брюстера). В этом случае поток $I_{\parallel}$ практически не отражается зеркально от поверхности ($\rho_{\parallel} = 0$), и интенсивность прошедшего света (т. е. величина $\tau_{\parallel}$) в значительной мере определяется процессами поглощения и рассеяния оптического излучения (ОИ) внутри ЛР. При той же величине падающего на лист потока $I_{\perp}$ доля зеркального компонента в отражении становится заметной, а потому относительная величина прошедшего потока уменьшается. Однако относительные изменения коэффициентов отражения ЛР для разной поляризации потоков освещения должны приводить к одинаковым соотношениям $\tau_{\parallel} : \tau_{\Delta} : \tau_{\perp}$ в любых спектральных интервалах. Поскольку это не так, можно предположить, что излучение различной поляризации по-разному рассеивается и поглощается внутри листа при 550 и 740 нм. Отмеченные особенности могут свидетельствовать о том, что линейно поляризованное в плоскости падения излучение поглощается внутри ЛР меньше, чем деполаризованное или линейно поляризованное перпендикулярно ПП.

Измеренные индикатрисы отражения очень многообразны по форме в зависимости от γ , различны для разных λ и проявляют чувствительность к характеру поляризации потока, используемого для освещения. Тем не менее для выбранных трех групп объектов можно выделить наиболее характерные черты индикатрис $\rho_{\lambda, \gamma}(\beta)$, соответствующие особенностям их строения и состояния.

При $\gamma \leq 30^\circ$ величина потока излучения от ЛР монотонно быстро увеличивается с уменьшением угла визирования β от 90° до минимально доступного для измерений. Практически для всех λ отражение света любой поляризации носит преимущественно диффузный характер у ЛЛ и ЛК. Несколько отличаются индикатрисы $\rho_{\lambda, \gamma}(\beta)$ у ЛБ для 460 и 680 нм. При этом более направленные («зеркальные») распределения в упомянутых спектральных полосах практически совпадают. Такое типичное распределение $\rho(\beta)$ соответствует преимущественному вкладу внутренней составляющей в поток от листовой пластинки ЛЛ и ЛК при малых γ и любой поляризации потока освещения. В областях сильного поглощения для ЛБ проявляется отражение от поверхности (более плотной кутикулы), что несколько изменяет вид индикатрис отражения.

Поведение индикатрис $\rho_{\lambda, \gamma}(\beta)$ при увеличении угла освещения от 30 до 50° характеризуется специфическим изменением их формы. При освещении I_{Δ} , $I_{\perp}$ для всех ЛР увеличение γ приводит к возрастанию поверхностного компонента в потоке от листа, о чем свидетельствует увеличение направленности $\rho_{\lambda, \gamma}(\beta)$, особенно в спектральных областях сильного поглощения. А при освещении потоком, поляризованным в плоскости падения, отражение/рассеяние сохраняет в основном диффузный характер. Увеличение угла освещения свыше 70° приводит к тому, что независимо от Р и Θ пучка освещения для любых λ у всех исследованных ЛР поток от листа формируется преимущественно за счет «зеркального» отражения от поверхности. Индикатрисы становятся вытянутыми, сравнительно узкими и в значительной мере соответствуют отражению от гладкой поверхности.

Наиболее характеристичными и информативными являются распределения $\rho_{\lambda, \gamma}(\beta)$ для всех ЛР при изменении γ от 50 до 70° . При таких углах освещения поток

от листа представляет суперпозицию поверхностного и глубинного компонентов, отношение которых особенно сильно меняется в области $\gamma \approx \beta \approx i_0$ (рис. 1). Для всех трех типов ЛР в спектральной полосе при 680 нм при $\gamma = 55^\circ$ и освещении деполаризованным или поляризованным перпендикулярно ПП светом для индикатрисы отражения характерно наличие максимума. При этом угол $\beta_{\max}$, соответствующий максимуму $\rho_{\lambda,\gamma}(\beta)$, не совпадает точно с $\beta_{\text{зерк}} = \gamma$, т.е. отражение «не строго зеркальное». Одной из причин, обуславливающих такое угловое распределение $\rho_{\lambda,\gamma}(\beta)$, можно, по-видимому, считать шероховатую поверхность листьев.

Поскольку для $\lambda = 680$ нм индикатрисы отражения имеют при освещении под углом 55° деполаризованным или поляризованным перпендикулярно ПП светом выраженный направленный характер, можно предположить, что в этом случае в

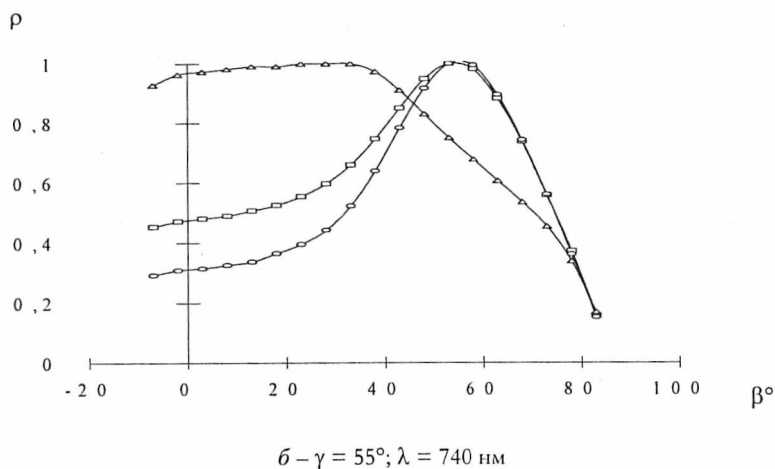
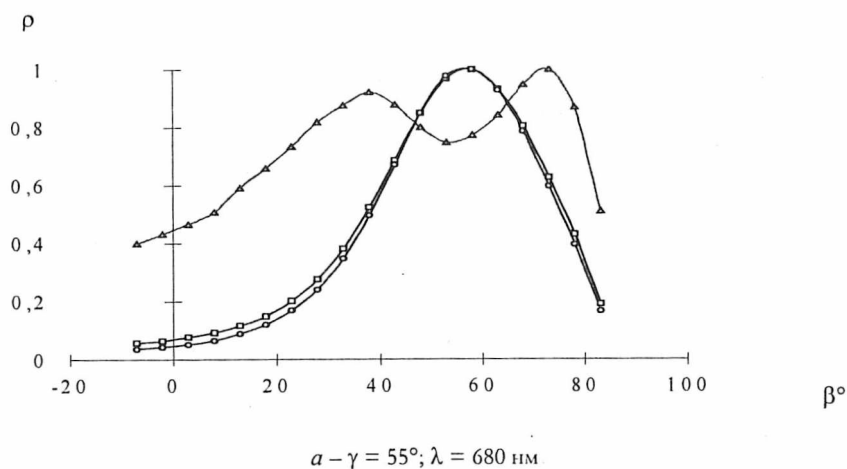


Рис. 1. Индикатрисы отражения для ЛБ при различной поляризации освещения ($I_\lambda - \square$, $I_\eta - \nabla$, $I_\perp - \circ$)

потоке от листа в диапазоне углов $30^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$ преобладает отраженный от поверхности компонент, о чем свидетельствует и поведение индикатрисы отражения при освещении I_η . При угле Брюстера коэффициент отражения поляризованной в плоскости падения волны для гладкой поверхности стремится к нулю. Этим, вероятнее всего, и обусловлено наличие «провала» (минимума) на кривой распределения $\rho_{\lambda,\gamma}(\beta)$ вблизи $\beta \approx 60^\circ$, что соответствует отражению от шероховатой поверхности под углом Брюстера.

Распределение $\rho_{\lambda,\gamma}(\beta)$ для угла $\gamma = 70^\circ$ во всех спектральных диапазонах имеет четкие максимумы, которые наблюдаются для углов β , практически равных углу освещения, т. е. отражение становится «зеркальным». Поведение индикатрис позволяет считать, что при таком освещении преобладает поверхностное отражение (особенно для ЛБ) и вклад диффузной составляющей в отраженный поток для областей сильного поглощения составляет всего $\approx 10\%$ от максимального значения, а для $\lambda = 740$ нм — около 50% . На основании анализа индикатрис отражения можно сделать заключение, что в спектральных участках при 460 и 680 нм излучение от ЛР при $\gamma = 70^\circ$ формируется в основном за счет отражения от поверхности и небольшой доли многократно рассеянного внутри листа потока излучения. (Для ЛБ вклад внутреннего диффузного компонента значительно меньше, чем для ЛЛ и ЛК). В спектральной области около 550 нм доля внутренней составляющей в потоке от листа становится большей, а для 740 нм поток от листа по-прежнему (как и при малых γ) формируется в значительной мере за счет вклада внутреннего компонента.

Анализ распределений $P_{\lambda,\gamma}(\beta)$ излучения от листа для разных длин волн показывает, что характер распределений и величина максимальных значений степени поляризации существенно зависят от угла освещения γ и вида поляризации потока освещения. Деполаризованный свет после отражения от ЛР почти всегда имеет азимут поляризации $\sim 90^\circ$, т. е. поляризован перпендикулярно плоскости падения; лишь при $\gamma \leq 60^\circ$ для углов $\beta \leq 30^\circ$ и $\lambda = 550$ и 740 нм отраженный поток поляризован преимущественно в плоскости падения.

Прошедший через ЛК поток излучения практически деполаризован ($P \leq 10\%$) для всех состояний поляризации падающего потока. При этом азимут $\Theta \approx 90^\circ$ соответствует частичной поляризации выходящего из листа многократно рассеянного потока, преломляющегося (и поляризующегося) на границе кутикула–воздух. Для листьев клена и липы в спектральных полосах сильного поглощения при освещении I_Δ практически во всех измерениях для положения $\beta^{\max}$ (максимума степени поляризации) проявляется такая связь с γ : в широком интервале углов освещения $\gamma + \beta^{\max} \approx 110^\circ$. Подобное поведение зависимости $P_{\lambda,\gamma}(\beta)$ можно объяснить тем, что основным механизмом поляризации излучения в полосе поглощения хлорофиллом ЛР является отражение на кутикулярной поверхности листовой пластинки. (При этом положение максимума степени поляризации должно подчиняться закону Брюстера.)

Поток излучения от ЛР поляризуется перпендикулярно ПП в силу двух причин: отражения от поверхности и преломления на границе кутикула–воздух при выходе из листа. Внутренний деполаризованный за счет многократного рассеяния компонент светового потока может слабо поляризоваться, выходя из листа при ма-

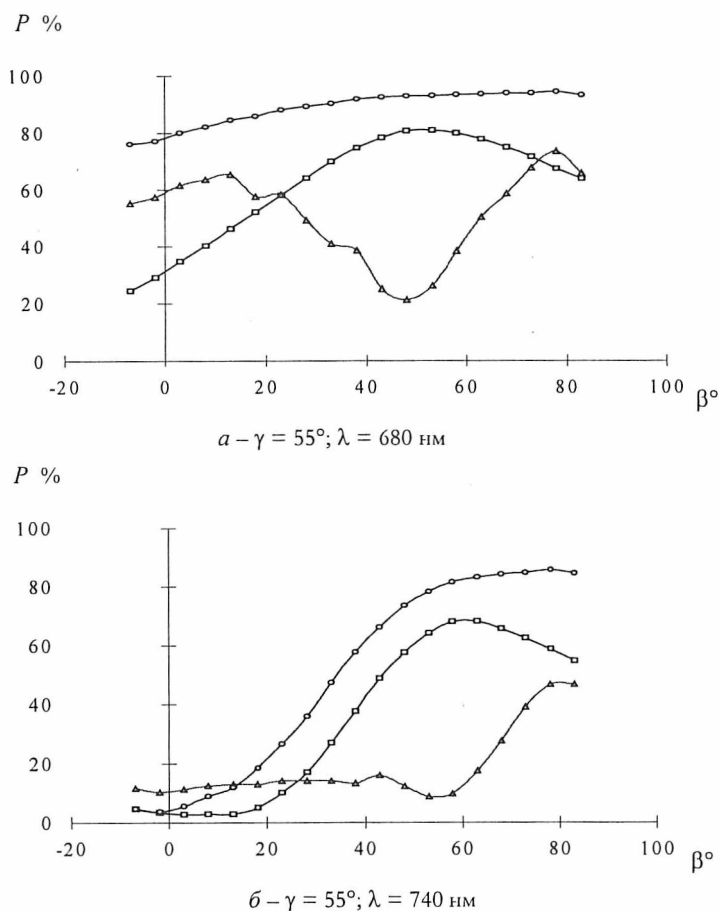


Рис. 2. Степень поляризации отраженного излучения для ЛБ при различной поляризации освещения ($I_{\parallel}$ — $\square$, $I_{\perp}$ — ∇ , I_{45} — $\circ$)

лых β , и достаточно заметно ($P \sim 15\%$) — при $\beta > 60^\circ$, независимо от γ . Именно за счет большой интенсивности внутренней составляющей результирующий поток от листа (как отраженный, так и прошедший) может быть деполаризован, особенно в области слабого поглощения.

Разделение внутреннего и поверхностного компонентов в потоке от ЛР легко осуществить, используя для освещения $I_{\perp}$ и $I_{\parallel}$ (рис. 2). Азимут преимущественной поляризации в прошедшем и отраженном потоках в обоих случаях соответствует типу поляризации падающего света. При освещении листа $I_{\perp}$ на 460 и 680 нм практически для всех γ и β отраженный от поверхности поток имеет максимальную степень поляризации $\geq 90\%$. При 550 нм и особенно 740 нм и освещении $I_{\perp}$ наблюдается существенная деполаризация потока от листа для углов $\beta \neq \gamma$. Если падающий на пластинку ЛР пучок света поляризован параллельно ГПП, то отраженный в значительной мере деполаризован при $\gamma \approx \beta \approx 55^\circ$ для 460 и 680 нм. Значи-

тельная деполяризация при освещении $I_{\parallel}$ характерна в областях слабого поглощения для $\beta < \gamma = 55^\circ$ или $30^\circ = \gamma < \beta < 55^\circ$. Это связано, на наш взгляд, с малой величиной френелевского коэффициента отражения $\rho_{\parallel}$, а потому с достаточно большим вкладом деполяризованного (многократно рассеянного) внутреннего компонента излучения.

Таким образом, учет поляризационных характеристик отраженного излучения позволяет констатировать, что при углах освещения $0^\circ \leq \gamma \leq 30^\circ$ отраженный от листа поток в видимом диапазоне длин волн для углов, удовлетворяющих условию $\gamma + \beta \geq 55^\circ$, обусловлен преимущественно многократным рассеянием в ЛР, которое слабо поляризовано в плоскости отражения за счет преломления на границе кутикула–воздух. Для углов освещения $\gamma \geq 80^\circ$ и диапазона 460–680 нм поток от ЛР формируется в основном за счет отраженного от поверхности листа излучения, которое поляризовано перпендикулярно плоскости падения. Степень поляризации достигает при этом максимального значения $\sim 90\%$ для углов $\beta \leq 30\text{--}35^\circ$. При освещении ЛР параллельным пучком в диапазоне углов $30^\circ \leq \gamma \leq 80^\circ$ отраженный поток включает как поверхностный, так и глубинный компоненты: а) для 460 и 680 нм преимущественный вклад вносит поляризованное перпендикулярно плоскости отражения излучение, причем этот вклад возрастает с увеличением γ и обусловлен отражением от поверхности; б) для 740 нм основная часть приходится на глубинный компонент, который для углов визирования $\beta \geq 120^\circ$ — γ поляризован перпендикулярно плоскости падения и P может достигать значений $\sim 40\%$, а для $\beta \leq 120^\circ$ — γ поляризован в плоскости падения и P не превышает 10% ; при этом максимум $P_{\lambda}(\gamma, \beta)$ наблюдается для $\gamma + \beta = 120^\circ$, что обусловлено рассеянием на внутрилистных частицах и преломлением на границе лист — воздух; в) для 550 нм наблюдается максимум степени поляризации до 55% в диапазоне $\gamma + \beta = 120\text{--}130^\circ$, который вызван суперпозицией обоих указанных выше механизмов; для углов $\beta \leq 100^\circ$ — γ излучение слабо поляризовано в плоскости падения, что объясняется многократным рассеянием внутри ЛР и преломлением на границе лист — воздух.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ НЕФЕЛОМЕТРИИ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Измерение поляризации оптического излучения, рассеянного растительными объектами, позволяет получать дополнительную информацию не только о параметрах внешнего покрытия растений, но и о внутренней структуре листа [26]. Эта информация может быть использована для контроля содержания влаги в листе, выявления патологических изменений в ткани растения, прогнозирования и контроля урожайности и т.п.

В работах [20, 21] проанализировано, как влияет на спектрально-поляризационные характеристики отраженного излучения изменение структуры растительной ткани при заболевании растения бактериальным раком. Практическая значимость этих исследований обусловлена тем, что бактериальный рак инфицирует ряд важнейших сельскохозяйственных культур и эпидемии этой болезни могут поразить до $80\text{--}100\%$ выращиваемых в питомниках растений. Был проведен ряд ла-

бораторных экспериментов по измерению угловой зависимости степени поляризации излучения, отраженного ЛР. В качестве объектов исследования были подготовлены модельные растения каланхое (*Kalanchoe daigremontiana*), зараженные бактериальным раком *Agrobacterium tumefaciens* IDI. На каждом отдельном объекте присутствовали как здоровые, так и больные листья.

Проведенный анализ спектрополяризационных характеристик излучения здорового и зараженного бактериальным раком *Kalanchoe daigremontiana* позволяет отметить следующие особенности: во-первых, в процессе развития заболевания возрастает доля однократно и многократно рассеянного растительной тканью излучения; во-вторых, особенности структуры функции $P_{\lambda}(\gamma)$ зараженного растения свидетельствуют об изменениях во внутриклеточном строении ткани, в частности, об изменении функции распределения внутриклеточных частиц по размерам за счет возрастания относительного числа сравнительно мелких частиц, меньших 2,5 мкм. Изменение строения кутикулы листьев, вызванное заболеванием, также находит свое отражение в ходе $P_{\lambda}(\gamma)$. В-третьих, снижение фотосинтетической активности в зараженных участках ткани приводит как к смещению положения максимума $P_{\lambda}(\gamma)$, так и к изменению структуры кривой в целом.

Спектрополяризационная нефелометрия, как метод бесконтактной оптической диагностики, представляется эффективной для экспрессного анализа как состояния растительности, так и общей экологической обстановки в местах произрастания лиственных деревьев. Целью работ [19, 22–25] было изучение взаимосвязи спектрополяризационных характеристик оптического излучения, рассеянного листом растения, с его состоянием при различном воздействии окружающей среды.

Объектами исследования служили листья клена (*Acer platanoides*) – одного из распространенных в г. Минске видов деревьев. В течение вегетационных сезонов 1993–1995 гг. выбирались образцы из районов города с различными условиями антропогенного воздействия: объекты типа А из сравнительно экологически чистого района (зеленая зона в районе Цнянского водохранилища) и объекты типа Б из района с повышенным загрязнением атмосферы и почвы (сквер у железнодорожного вокзала). Одновременно проводились измерения спектрополяризационных характеристик излучения от листьев на разных стадиях высыхания. Показано, что вид распределений $P_{\lambda,\gamma}(\beta)$ и $\Theta_{\lambda,\gamma}(\beta)$ существенно различается для листьев, выросших в разных метеорологических условиях на любом этапе вегетации. Вместе с тем следует отметить, что индикатрисы отражения и угловые распределения спектрального коэффициента яркости для этих же объектов не имели столь характерных различий.

Сравнение спектрополяризационных характеристик излучения листьев клена в 1993 и 1994 гг. показывает, что метеорологические условия, а именно количество осадков в вегетационный период, оказывают существенное влияние на поляризующую способность растительного листа. При этом сохраняется заметное различие в ходе $P_{\lambda,\gamma}(\beta)$ для листьев, выросших в различных экологических условиях, независимо от количества осадков.

Таким образом, было установлено, что влияние неблагоприятных условий экологически грязного района города в течение вегетационного сезона приводит к уменьшению максимальных значений степени поляризации излучения, рассеянного листом клена, и к смещению положения максимума поляризации в сторону больших углов визирования. Напротив, для листьев деревьев из экологически от-

носителем чистого района города максимальные значения степени поляризации возрастают на протяжении всего вегетационного периода, а положение максимума меняется очень слабо.

Сравнительный анализ показал, что в течение первых 2–3 ч после отделения листа от ветки растения его спектрополяризационные характеристики практически не меняются. Следовательно, результаты измерений на листьях в первые часы после отделения от растения могут служить основой лабораторного моделирования дистанционной оптической диагностики состояния растительных объектов. Затем по мере высыхания (спустя сутки и более) спектрополяризационные характеристики претерпевали существенное изменение. Высыхание отдельного листа сопровождается заметным уменьшением максимального значения степени поляризации, а также некоторым сдвигом его положения в сторону больших β . Можно предположить, что подобные изменения обусловлены увеличением деполяризации излучения за счет возрастания шероховатости поверхности и увеличением вклада многократно рассеянного внутри листа излучения. Характеристичность изменений спектрополяризационных параметров отраженного растительным листом излучения может послужить спектроскопическим признаком для дистанционной оптической диагностики потери растениями влаги.

Основной метод селекции картофеля – создание гибридных популяций с последующим выбором форм, имеющих все необходимые технологические и биологические характеристики. Существует потребность в развитии специальных экспресс-методов, которые уже на начальных этапах селекции позволяли бы сокращать количество образцов, выбирая для оценки и селекции семена с лучшим генотипом, являющиеся носителями генов, обеспечивающих нужные качества (устойчивость к вирусам, фитофторе, продуктивность и т. д.). Такие экспресс-методы должны обеспечивать оценку результатов полевых опытов в целях агрономии сорта, улучшения его фенотипа, а также раннее выявление гибридов с положительными качествами.

Целью работ [27–29] было применение метода спектрополяризационной нефелометрии для идентификации сортов картофеля и гибридов в лабораторных условиях, а также определение принципов идентификации для полевых условий. Результаты работы важны для создания теории рассеяния излучения тканью растения и для изучения поляризующей способности растительного листа и механизмов поляризации рассеянного и отраженного света.

Для определения угловых зависимостей спектроэнергетических и спектрополяризационных параметров излучения (отраженного, пропущенного, поглощенного и испущенного в процессе люминесценции листом растения) была создана гониометрическая установка на основе спектрополяриметра «Гемма» МС-08 [28]. На ней в течение всего сезона вегетации был проведен цикл измерений спектральных и угловых распределений поляризационных характеристик излучения, отраженного листьями картофеля *Solanum tuberosum* разных сортов (орбита, санте и скарб). Обработка и анализ результатов основаны на изучении формы и характеристик угловых зависимостей степени поляризации $P_{\lambda,\gamma}(\beta)$ и спектральной плотности энергетической яркости $L_{\lambda,\gamma}(\beta)$ излучения, т. е. функций данных параметров от угла наблюдения при фиксированной длине волны λ и $\gamma = 70^\circ$, аналогично [29]. Построены диаграммы, в которых по оси X откладывались средние по месяцам положения максимумов степени поляризации ($\beta_{\max}$), а по оси Y – средние по месяцам

величины этих максимумов ($P_{\max}$) для каждой из анализируемых длин волн. Здесь же определялись и средние значения по всему периоду вегетации. Анализ диаграмм показывает, что их вид зависит от сорта картофеля, и $P_{\max}$ возрастает в течение вегетационного периода для всех длин волн и всех сортов. Подобное свойство отмечено и для $\beta_{\max}$: максимумы смещаются в сторону больших углов наблюдения, однако только для длин волн до 700 нм в ИК области спектра смещения не наблюдалось. Такое «поведение» $P_{\max}$ и $\beta_{\max}$ легко объяснить при учете механизмов поляризации излучения тканью растений [27].

В качестве признака, позволяющего распознавать сорта картофеля с разными сроками созревания, может быть предложена величина максимума угловой зависимости степени поляризации излучения, отраженного листом картофеля, $P_{\lambda, \gamma}(\beta)$. При проведении исследований в натуральных условиях степень поляризации должна измеряться в области 500–700 нм вблизи максимума зависимости $P_{\lambda, \gamma}(\beta)$ (при угле падения $\gamma = 70^\circ$ угол наблюдения должен быть в пределах $\beta = 40\text{--}45^\circ$). Пространственные характеристики отраженного излучения определяются соотношением механизмов поляризации: зеркально отраженное излучение преобладает вблизи направления зеркального блеска, в области $\beta = 65\text{--}75^\circ$, для всех длин волн λ . В интервале $\beta = 10\text{--}65^\circ$ роль механизмов зависит от λ . Для $\beta = -10\text{--}+10^\circ$ преобладает диффузно рассеянное излучение.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ «ФИЗИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА» В БЕЛГОСУНИВЕРСИТЕТЕ

Ушедший век оставил в наследие человечеству не только великие открытия в физике и математике, биологии и электронике, химии и информатике, но и многочисленные проблемы, связанные с антропогенным воздействием на окружающую среду. Стало понятно, что усилиями лишь общественных организаций нельзя обеспечить охрану окружающей среды, поскольку для практического решения этой комплексной задачи необходим высокий уровень специальных знаний и технологий. Многогранность такого рода задач потребовала создания экологических отраслей науки и техники, привлечения в экологию ученых и специалистов различного профиля. Многие вузы стали готовить специалистов по экологии, решая эту проблему по двум направлениям: либо обучая специалиста в рамках достаточно узкого направления экологических знаний (эколог-химик, эколог-биолог и т. д.), либо давая экологическое образование по целому спектру наук, упуская многие вопросы специальных дисциплин.

С другой стороны, экологические исследования и технологии связаны с достаточно сложными техническими и математическими методами. Экологический мониторинг требует разнообразия аналитических подходов, сложной оптикоэлектронной аппаратуры, обработки больших массивов данных при помощи современных ЭВМ, создания специальных пакетов программ для ее обеспечения.

Непростая экологическая ситуация в Республике Беларусь, значительно ухудшенная последствиями катастрофы на Чернобыльской АЭС, наличие районов с чрезвычайно высоким уровнем химического и радиационного загрязнения, необходимость проведения экологического мониторинга и исследования состояния природной среды, рационального использования природных ресурсов сделали

весьма актуальным разработку и создание новых комплексных методов мониторинга территорий с применением дистанционных, наземных и лабораторных методов и средств измерений.

За последние годы в Беларуси создана целая сеть геоэкоинформационных структур, позволяющих решать сложные экологические задачи. Для их функционирования потребовались специалисты различного профиля, в том числе и физики, владеющие современными физическими методами получения, обработки, хранения и анализа информации с использованием ЭВМ. Об этом свидетельствуют и изложенные выше результаты оригинальных исследований.

В целях подготовки специалистов такого профиля и была введена на физическом факультете БГУ новая специализация «Физическая информатика» [31, 32].

Методические аспекты формирования учебного плана и программ спецкурсов данной специализации основаны на следующих принципах:

- фундаментальная подготовка по физике строения вещества и переноса излучения, изучение процессов взаимодействия излучения с жидкими, газообразными, твердыми и плазменными системами как фундаментальные основы современных физических методов диагностики;
- освоение методов и средств получения, выделения и обработки физической информации, проведение компьютерного эксперимента для решения практических задач по дистанционной диагностике среды;
- изучение экологических аспектов физических процессов и явлений, протекающих в природе, и их связи с деятельностью человека;
- последовательная и непрерывная компьютерная подготовка, совершенствование знаний основных языков программирования, широко используемых при обработке физической информации, больших массивов данных, сопоставлении теории и эксперимента.

Подготовка высококвалифицированных специалистов-физиков, работающих по проблемам экологии, требует оптимального сочетания фундаментальной подготовки в области физики, математики, информатики и для решения прикладных задач. Этого можно достичь, лишь увязывая воедино цепочку общих и специальных дисциплин, включая и лабораторный практикум. Такой учебный план реализован на кафедре атомной физики и физической информатики БГУ, где осуществляется подготовка специалистов в области геоэкоинформатики [30–35]. Цикл включает базовые курсы лекций по методам и средствам физических измерений с упором на дистанционную оптическую диагностику. К ним относится курс лекций по оптической спектрометрии и энергетической фотометрии, в котором наряду с изучением общих вопросов фотометрии, принципов действия и характеристик спектральных приборов изучаются вопросы, связанные с задачами оптического дистанционного зондирования, методикой и аппаратурой, обеспечивающей такие эксперименты, их использованием при изучении вопросов экологии окружающей среды, состояния растительного покрова. Данный курс сопровождается спецлабораторией по спектрометрическим измерениям.

Специальный курс «Экогеоинформатика: дистанционная диагностика природной среды» знакомит студентов с задачами и техническими средствами дистанционного зондирования природной среды, организацией радиационного и экологического мониторинга, методами тематической интерпретации данных. В нем обсуждаются вопросы, связанные с прямыми и обратными задачами дистанционного

зондирования, приборами, осуществляющими эксперимент, методами распознавания образов в задачах обработки аэрокосмической информации, структурой геоинформационных систем [32, 33].

В ряду таких курсов важное место занимает спецкурс «Основы физики атмосферы», в котором излагаются основные сведения о физических процессах в атмосфере, их количественной теории и взаимных зависимостях. Определенная часть курса посвящена экологическим проблемам. Рассматриваются малые составляющие атмосферы, озон и озоновые «дыры», природные и антропогенные влияния на распределение озона и динамику изменения параметров атмосферы. Затрагиваются вопросы экологии атмосферы, парниковый эффект, анализируются международные соглашения по климату, рассматривается трансграничный перенос загрязнений.

Лабораторный цикл подготовки по специализации с учетом экологической направленности включает изучение методов и средств спектрально-оптической диагностики, детектирующих приборов и устройств, а на последней стадии обучения — использование полученных навыков при исследовании физических процессов и характеристик объектов в различных агрегатных состояниях. Особенностью данного лабораторного цикла является широкое применение персональных ЭВМ на стадиях проведения эксперимента, обработки результатов и их анализа; использование наряду с традиционными средствами измерений приборов и систем, примененных в настоящее время непосредственно в геоэкоинформационных комплексах; привлечение студентов к натурным измерениям ряда геоэкоинформационных параметров (интенсивность и поляризация естественного излучения, ультрафиолетовое излучение Солнца и т. д.). Этот специальный лабораторный цикл подкрепляется целым рядом других лекционных дисциплин, основная задача которых дать целенаправленные знания для более эффективного и творческого участия студентов в научном эксперименте в период выполнения курсовых и дипломных работ в области экологии. Так, в курсе «Взаимодействие излучений с твердым телом и методы регистрации» изучаются процессы взаимодействия оптических фотонов, высокоэнергетических излучений и частиц с твердым телом. Обсуждаются принципы работы и характеристики энергетических и тепловых фотоприемников. Рассматриваются механизмы образования радиационных дефектов в твердых телах, работа газоразрядных, полупроводниковых и трековых детекторов. Физический базис знаний о взаимодействии электромагнитного излучения с атомно-молекулярными системами в газовых и жидких средах, излагаемых в курсе «Преобразование электромагнитного излучения газофазными и жидкофазными системами», позволяет студентам более аргументированно и профессионально изучать многие экологические проблемы, связанные с влиянием излучения различного спектрального состава на природные системы.

Важным элементом экологических аспектов подготовки физиков является изучение вопросов, непосредственно связанных с получением, хранением, передачей, обработкой и отображением различной физической информации, т. е. вопросов исследования информационных потоков. В учебном плане специализации этот блок занимает особое место, поскольку спецкурсы и спецлаборатории организованы на каждом из трех старших курсов. Общие вопросы физической информатики и машинной обработки результатов присутствуют в таких спецкурсах 3-го курса, как «Физические основы информационных процессов», «Методы программирова-

ния и обработки экспериментальных данных», специализированные «Методы обработки информации с помощью ЭВМ». На старших курсах, когда студенты начинают активно заниматься научной работой, им требуются более обширные знания в области языков программирования и методов решения задач на ЭВМ. Студентам предлагаются курсы «Программирование на языке СИ» и «Особенности программирования на СИ++ и компьютерное моделирование». Это тем более важно, что студенты, готовя себя к работе в различных областях науки и техники, связанных с геоэкоинформатикой, должны уметь обрабатывать на ЭВМ большие массивы данных, моделировать различные физические процессы, решать экологические задачи.

Результатом многих научно-исследовательских работ студентов стала практическая реализация разработок, связанных непосредственно с решением экологических проблем: «Модель лидарной системы для трассового газоанализа на основе CO₂-лазера», «Разработка пакета программ математической обработки данных дистанционного зондирования для Windows-95 и Windows-NT», «Компьютерное моделирование распространения вредных примесей в атмосфере на большие расстояния», «Проблемы использования интерференционных фильтров в озонометрических приборах», «Исследование деполяризующей способности листа растения при рассеянии света» [34].

Важной особенностью подготовки студентов на кафедре физической информатики является то, что она осуществляется по двум направлениям: физик-исследователь и физик-преподаватель. Специализация «Физическая информатика», включающая экологические аспекты подготовки, формирует у будущего учителя школы или преподавателя вуза широкий кругозор и эрудицию, так необходимые специалисту для общения с молодежью [35]. Понятно, что авторитет у учеников можно завоевать не только и не столько новейшими методическими приемами и способами, сколько знанием своего предмета, умением связывать воедино информацию из различных разделов физики и смежных наук. Подготовленный нами преподаватель физик-эколог имеет четкие представления о взаимосвязи техногенной деятельности человека с состоянием окружающей среды, может научно обосновать необходимость развития наукоемких технологий, методов защиты окружающей среды, поиска альтернативных и экологически чистых источников энергии.

Как результат того, что многие курсы и лаборатории или разделы учебного плана упомянутой выше специализации так или иначе связаны с проблемами экологии, физическими методами анализа и контроля состояния окружающей среды, является тот факт, что студенты после окончания вуза имеют возможность работать в организациях и на предприятиях в области современных экологических исследований и технологий, успешно осуществлять педагогическую деятельность в школе и вузе.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Он передал на Землю: «Арал погибает»: интервью с В. В. Коваленком // Союз. Беларусь-Россия. Период. издание Совета Министров Союзного государства, 2001. 12 апр. С. 3.
2. Адзериго К. С., Киселевский А. И., Костюкевич С. Б., Краснопрошин В. В. Физические принципы дистанционного зондирования. Мн., 1991.
3. Розенберг Г. В. // Успехи физических наук. 1977. Т. 56, вып. 1. С. 77.
4. Атрашевский Ю. И., Киселевский А. Н., Сикорский В. В. и др. // Статистические методы и средства обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды: Тез. Докл. Межвед. науч.-техн. совещ. Мн., 1989. С. 77.