

УДК 615.849.19

ГАЗОРАЗРЯДНО-ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Бойченко А. П.¹, Кравченко А. А.², Яковенко Н. А.³

GAS-DISCHARGE PHOTOGRAPHIC MONITORING OF VEGETATIVE ECOLOGICAL SYSTEMS

Boychenko A. P., Kravchenko A. A., Yakovenko N. A.

On an example sheets of birch leaves (*Betula pendula* Roth.), growing within the territories of Krasnodar city with a various level of anthropogenous influence, we show the approbation results of the advanced technological way of bioindication for the ecological condition estimation of a district through gas-discharge photographic monitoring. With the specially developed electro-optical device the possibility of an express estimation of geometrical asymmetry factor for 4,000 gas-discharge leaves images was shown and definition of new parameter – asymmetry factor of their gas-discharge luminescence is given.

Keywords: birch, bioindication, geometric asymmetry leaf, brightness asymmetry leaf, gas-discharge photographic monitoring, gas-discharge images

Большое научно-практическое значение для экомониторинга окружающей среды приобретают в настоящее время методы биоиндикации и биотестирования [1]. С их помощью удается получать объективную информацию о комплексе воздействующих на экосистемы факторов. Поэтому разработка новых и совершенствование имеющихся методов и средств биоиндикации является одним из актуальных вопросов экологии. Особенно актуален он для мониторинга растительных экосистем (РЭС), поскольку они не только первыми получают такую нагрузку, но и испытывают максимум ее интенсивности.

Одним из перспективных и хорошо зарекомендовавших себя биоиндикационных методов оценки общего уровня антропогенного воздействия является основанный на изменении гомеостаза морфогенетических процессов, разработанный российскими учеными В.М. Захаровым, В.В. Зюгановым, Б.И. Шефтель и др. [2, 3]. Главным показателем изменений этих процессов является флуктуирующая асимметрия — ненаправленные различия между правой и левой сторонами различных морфологических струк-

тур организмов, которые в норме обладают билатеральной симметрией и сильно изменяющихся при различных стрессирующих воздействиях. Позднее данная методика была усовершенствована и применена для мониторинга РЭС сотрудниками Калужского государственного педагогического университета [4]. Объектами биоиндикации авторы выбрали листья растений, в частности, листопадных деревьев, для которых асимметрия листовых пластинок оценивается по пяти геометрическим параметрам: ширина половинки листа; длина второй жилки второго порядка от основания листа; расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; расстояние между концами этих жилок; угол между главной жилкой и второй от основания жилки второго порядка. Измерение перечисленных параметров не сложно в инструментальном и методическом исполнении, но требует значительного времени на обработку, особенно для биоматериала, собранного с больших площадей. Кроме того, методика не предполагает сохранение листьев на материнском растении и не предусматривает прямую передачу данных

¹Бойченко Александр Павлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: bojchenko@yandex.ru

²Кравченко Алексей Анатольевич, студент 5 курса физико-технического факультета Кубанского государственного университета; e-mail: alexkr06@rambler.ru

³Яковенко Николай Андреевич, д-р техн. наук, профессор кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: dean@phys.kubsu.ru

непосредственно с места их сбора (например, в центральный пункт, обычно удаленный на десятки и сотни километров). Поэтому в настоящей работе была поставлена цель: устранить перечисленные недостатки описанной методики мониторинга РЭС путем ее максимальной автоматизации оптоэлектронными и программными средствами, а также дополнить геометрические параметры листьев физическими за счет привлечения плазменных технологий, электрополевых и аналого-цифровых средств преобразования и переработки информации.

1. Материалы и методы

Как было показано ранее [5], по своей электрической природе и организации различные биообъекты являются ионными полупроводниками с коллективным характером взаимодействия электрически заряженных частиц, концентрация которых сопоставима с электронной концентрацией легированных полупроводников. Из чего следует, что любые, даже самые незначительные морфологические изменения в структуре листовых пластинок могут быть надежно выявлены посредством внешнего однородного электрического поля, с увеличением напряженности которого чувствительность к таким изменениям возрастает. Для электрополевой визуализации геометрических неоднородностей морфологических структур пригодны среды, способные за миллионные (и менее) доли секунды преобразовывать энергию электрического поля в световую. Такими средами, например, являются электролюминофоры и низкотемпературная плазма барьерного газового разряда (БГР), возникающего между электродами, один из которых (реже оба электрода) покрыт диэлектриком. Благодаря перечисленным свойствам этих сред для достижения поставленной цели было разработано оптоэлектронное устройство, названное «Газоразрядно-цифровой электрофотоаппарат» (ГЦЭФ), и позволяющее визуализировать изображения листьев площадью до $15 \times 15 \text{ см}^2$ с последующей их передачей по каналам радиосвязи (например, с помощью GPRS) и программно-компьютерной обработкой. Указанной площади визуализации вполне достаточно для изучения и мониторинга РЭС большей части произрастающих в России и Европе кустарников и деревьев, для листьев которых разработана данная методика [4]. Сменные блоки ГЦЭФ позволяют

получать как электрополевые, так и газоразрядные изображения (ГРИ) в реальном геометрическом и временном масштабе без отделения листьев от материнского растения, а проводимые с его помощью исследования — в лабораторных или полевых условиях. Кроме того, вмонтированные в ГЦЭФ светодиоды белого света дают возможность получать оптические изображения листьев как с одной стороны, так и с обеих сторон. Прибор питается высоковольтным импульсным напряжением, параметры которого приведены в табл. 1 вместе с технико-эксплуатационными характеристиками ГЦЭФ, а на рис. 1 представлена схема его устройства.

Здесь 1 — видеокамеры черно-белого изображения чувствительностью до $3 \cdot 10^{-4}$ лк с объективами 2 из «просветленной оптики», каналами электрического питания 3 и выходными видеоканалами 4; 5 — вращающиеся кассеты со светофильтрами 6 (при получении черно-белых изображений они используются для повышения их контрастности или оптико-спектроскопического выделения интересующих элементов биоматериала); 7 — газоразрядные камеры, состоящие из оптического или кварцевого стекла 8 (в зависимости от задач исследований) с токопроводящим покрытием из SnO_2 9; 10 — исследуемый лист растения, образующий со стеклами 8 газоразрядный промежуток 11; 12 — высоковольтный импульсный генератор для создания электрического поля в газоразрядном промежутке или слое электролюминофора; 13 — светодиоды белого света для подсветки листьев и получения их оптических изображений. При электрополевой визуализации элементы 5, 6 и 11 отсутствуют, а элементу 8 соответствует стекло с впеченным в него электролюминофором. Отметим, что использование цветных видеокамер для электрополевой визуализации или оценки только геометрических характеристик по ГРИ листьев нецелесообразно, т.к. максимум спектра излучения электролюминофоров или БГР занимает узкий диапазон в той или иной области оптического спектра шириной не более 130 нм.

Предварительные испытания ГЦЭФ в лабораторных условиях на листьях 30-дневных проростков пшеницы, подсолнечника и сои выявили резкие отличия в морфологии структуры верхней и нижней частей ГРИ их листовых пластинок, что видно на примере листа сои, изображения которого приведены на рис. 2. Визуально наблюдаемое

Таблица 1. Электрические и технико-эксплуатационные параметры ГЦЭФ

№ п/п	Наименование параметра или процедуры	Значение или характеристика
1	Амплитуда напряжения питания (регулируется плавно), кВ	1,0–15,0
2	Форма импульсов питающего напряжения (в зависимости от задач мониторинга)	а) однополярный видеоимпульс колоколообразной формы и регулируемой длительностью от 1 до 20 мкс; б) экспоненциально затухающий радиоимпульс с частотой заполнения ~150 кГц и регулируемой длительностью от 50 до 150 мкс; в) П-образный радиоимпульс с регулируемой частотой заполнения от 5 до 12 кГц и длительностью, определяемой временем экспозиции
3	Частота следования импульсов, кГц*	0,5–3,0
4	Время экспозиции (в зависимости от задач мониторинга), с	0,1–300,0
5	Время размещения листовой пластинки в газоразрядной или электролюминесцентной камере (для подготовленного оператора) не более, с	3
6	Количество человек, требуемых для эксплуатации прибора в полевых условиях, не более	2

* Для вариантов импульсов, описанных в пунктах а) и б)

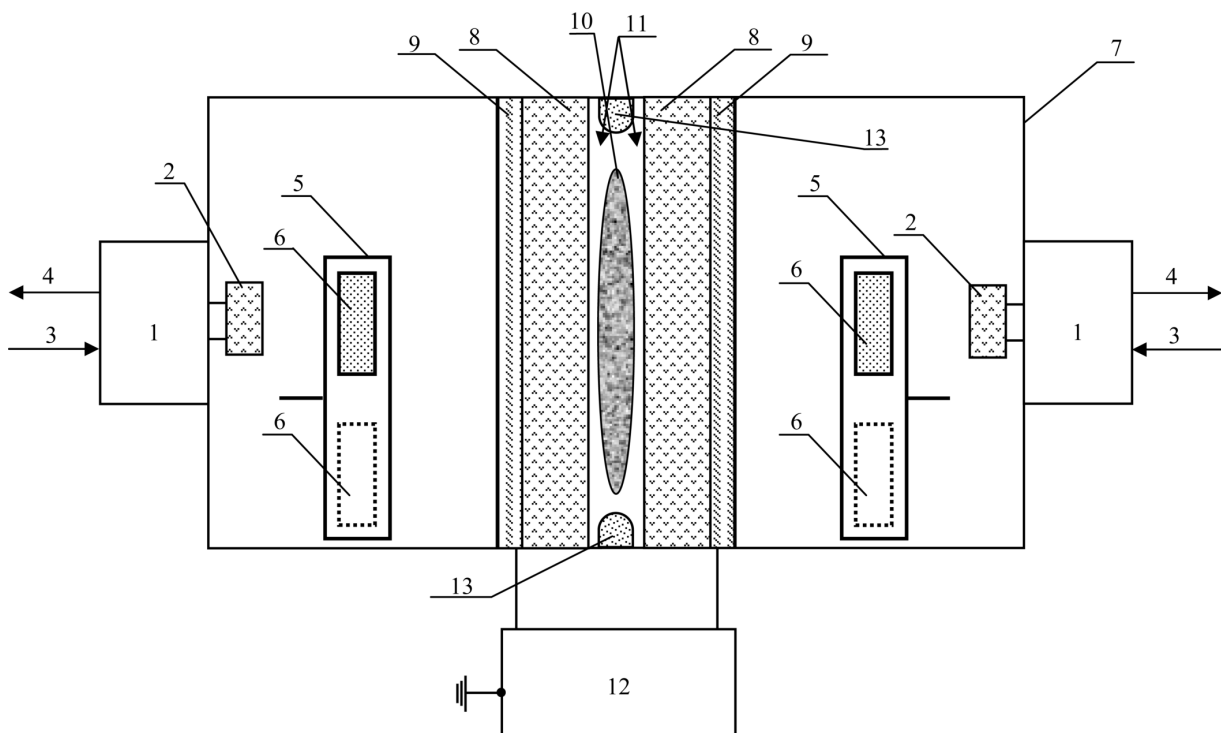


Рис. 1

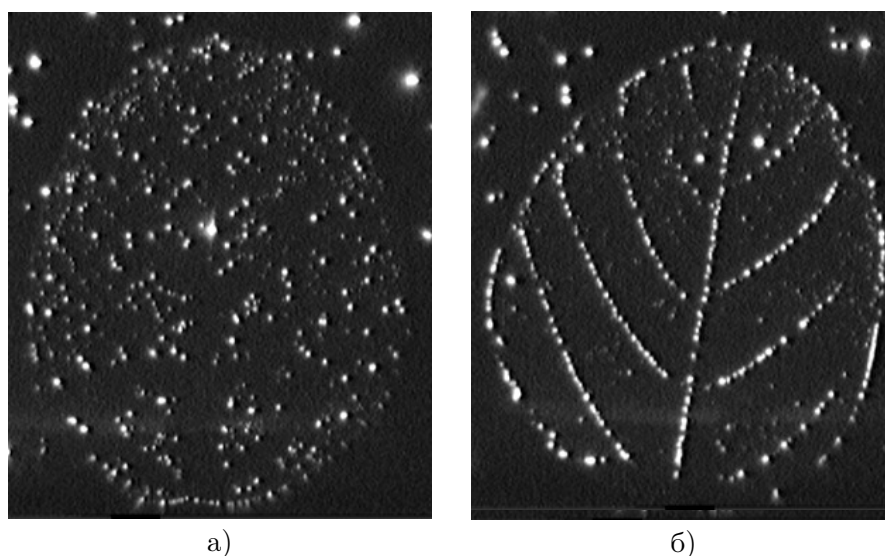


Рис. 2. ГРИ листьев сои: *a* — верхняя сторона листовой пластинки; *б* — нижняя сторона листовой пластинки

или регистрируемое камерами в свете светодиодов жилкование с обеих сторон листа в условиях горения БГР проявилось только на его нижней стороне, тогда как на верхней — ГРИ выражено россыпью ярко светящихся точек. Аналогичная закономерность была выявлена для листьев других исследованных в работе растений. Кроме того, исследования показали, что взаимодействие с биоматериалом БГР обладает большей информативностью по сравнению с электролюминофорами за счет эмиссионных процессов, связанных с послышным травлением биоматериала и выносом накопленных за период жизнедеятельности организма веществ в зону горения разряда. Последнее обстоятельство позволяет кроме геометрических показателей определять и химический состав листьев путем спектроскопии их газоразрядного свечения, что является отдельной областью исследований. В настоящей статье приводятся первые результаты апробации технологически усовершенствованного способа биоиндикации для оценки экологического состояния местности путем газоразрядно-фотографического мониторинга (ГРФМ) РЭС.

Материалом для апробации ГРФМ служили листья березы повислой (*Betula pendula* Roth.), произрастающие в различных районах города Краснодара, как подвергающиеся интенсивному антропогенному воздействию, так и удаленных от его источников на десятки километров. В первом случае были выбраны листья деревьев, произрастающие

на обочине дорог с интенсивным движением авто- и электротранспорта, включая проложенные по ним воздушные линии электропередачи напряжением 380 В (участок по улице Мира между пересекающимися ее улицами Кубанская набережная и Кирова). При этом для фотографирования выбирались листья деревьев, кроны которых имели прямой контакт с названными линиями. Во втором случае исследовались деревья, произрастающие в центральной части парковой зоны города («Чистяковская роща»). ГРФМ проводился в конце августа 2007 и 2010 гг., что соответствует завершению интенсивного роста и формирования листьев. Получаемые при этом ГРИ могли сразу передаваться в центральный пункт сбора информации (Кубанский госуниверситет), который географически равноудален от указанных мест мониторинга приблизительно на 5,5 км.

Цифровая обработка ГРИ листьев осуществлялась с помощью специально разработанной программы «GDF-Ecology» [6]. Кроме пяти перечисленных выше геометрических параметров она позволяет обрабатывать изображения листьев по яркости их газоразрядного свечения с верхней и нижней стороны, а также определять яркость свечения отдельных морфологических элементов, например, жилок, на поверхности которых горение разряда наиболее интенсивно. Усредненные значения названных параметров (взятые по модулю) служат для оценки геометрического коэффициента асимметричности листьев \bar{Y}_G и яркостного коэффициен-

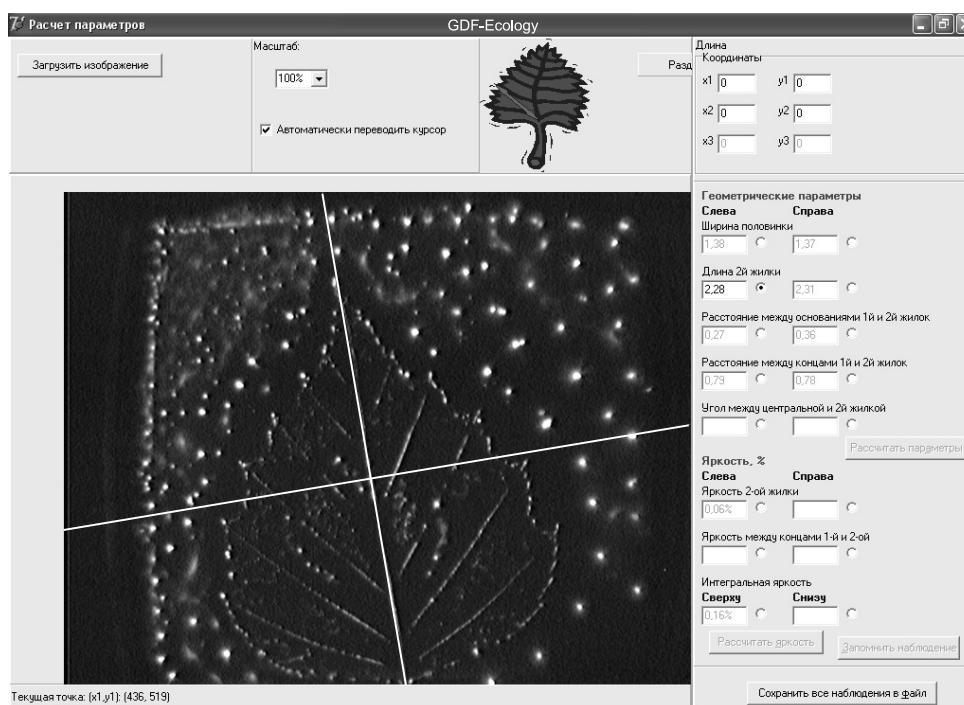


Рис. 3. Окно программы “GDF-Ecology”

та асимметричности их газоразрядного свечения \bar{Y}_{GDF} по формулам

$$\bar{Y}_G = \frac{\bar{X}_л - \bar{X}_п}{\bar{X}_л + \bar{X}_п}; \quad \bar{Y}_{GDF} = \frac{\bar{X}_в - \bar{X}_н}{\bar{X}_в + \bar{X}_н},$$

где $\bar{X}_л$ и $\bar{X}_п$ — средние значения промеров листьев с левой и правой сторон, а $\bar{X}_в$ и $\bar{X}_н$ — средние значения оценки интегральной яркости листьев с их верхней и нижней сторон. Таким образом, ГРИ каждого листа растения обрабатывается программой по шести параметрам с двенадцатью значениями X . Пример работы окна программы “GDF-Ecology” с ГРИ нижней стороны листовой пластинки березы представлен на рис. 3. Из него видно, что программа выполняет все процедуры, необходимые для оценки геометрических параметров листьев с левой и правой стороны относительно центральной жилки. Алгоритм этой процедуры в точности соответствует описанной авторами методики [4].

Для определения яркостных параметров на выбранном элементе изображения (или на всем изображении) оператор осуществляет его окантовку точками, после чего нажимает клавишу программы «Расчитать яркость». Результат сразу вписывается в соответствующую ячейку (например, «Интегральная яркость», «Сверху»). Каждая из описанных операций сопровождается мультипликационной картинкой ее выполнения

в виде схематичного рисунка листа, размещенного в верхней части окна программы второго сектора справа, и служит хорошей подсказкой для начинающего оператора. После чего все полученные данные заносятся в отдельный файл (нажатием клавиши «Сохранить все наблюдения в файл») и затем статистически обрабатываются стандартными программными средствами.

2. Результаты и обсуждение

С помощью ГЦЭФ было получено около 2000 снимков листьев для каждого варианта произрастания березы. Практически установлено, что на полную обработку массива данных по двум исследованным территориям (т.е. на обработку ~ 4000 ГРИ) и выдачи заключения ГРФМ затрачивается не более 4 ч. (не считая времени на проезд от одной территории к другой). Поэтому для уменьшения указанного времени и повышения оперативности мониторинга целесообразно одновременное использование двух и более ГЦЭФ на каждой из исследуемых территорий, что практически может быть реализовано формированием нескольких бригад, состоящих из двух человек (табл. 1). Результаты ГРФМ РЭС по листьям березы сведены в табл. 2, содержащую пятибалльную шкалу отклоне-

Таблица 2. Результаты ГРФМ березы повислой по коэффициентам асимметричности и яркостного свечения листьев

Территория фотографирования листьев		Годы			
		2007		2010	
		\bar{Y}_G	\bar{Y}_{GDF}	\bar{Y}_G	\bar{Y}_{GDF}
Чистяковская роща		0,029±0,003	0,466±0,014	0,036±0,002	0,291±0,030
Обочина автодороги по ул. Мира		0,056±0,003	0,539±0,027	0,057±0,004	0,342±0,017
Шкала отклонения от нормы геометрического коэффициента асимметричности \bar{Y}_G для листьев березы повислой					
Балл	Значение геометрического коэффициента асимметричности \bar{Y}_G		Соответствующее состояние экосистемы		
1	до 0,055		Условно нормальное		
2	0,055–0,060		Начальные (незначительные) отклонения от нормы		
3	0,060–0,065		Существенные нарушения		
4	0,065–0,070		Опасные нарушения		
5	более 0,070		Критическое состояние		

ния от нормы геометрического коэффициента асимметричности \bar{Y}_G [4].

2.1. Результаты оценки геометрического коэффициента асимметричности \bar{Y}_G

Полученные результаты оценки этого параметра полностью согласуются с данными других исследователей, привлекавших рассматриваемый метод биоиндикации для определения уровня антропогенного воздействия на различные экосистемы [7, 8]. В соответствие с пятибалльной шкалой величин \bar{Y}_G , территория Чистяковской рощи является экологически благоприятной для нормального произрастания и функционирования РЭС. Отсутствие существенных нарушений симметрии в морфологии структуры листьев березы, по-видимому, объясняется не только значительной удаленностью рощи от различных источников антропогенного воздействия (магистралей, заводы и предприятия), но и вероятно экранирующим действием других древесных растений, произрастающих совместно с *Betula pendula* Roth. По незначительно различающимся величинам \bar{Y}_G для 2007 и 2010 гг. (не превышающих 0,002 единиц в пределах его доверительных интервалов) можно сказать, что на физиологические и морфогенетические процессы гомеостаза березы не оказала существенного влияния и аномально высокая температура (до +45°С в тени), отмечавшаяся на Кубани летом 2010 г.

Для березы, произрастающей на обочине автодороги с интенсивным движением транспорта (в среднем 17280 единиц в сутки), а

также дополнительным воздействием от него выхлопными газами, акустическим излучением и электромагнитного поля от воздушных линий электропередачи, величина \bar{Y}_G ее листьев приближается к 3-х балльной отметке, что говорит о нарушении экологической обстановки. Причем, эти величины для ГРФМ за 2007 и 2010 гг. не различаются. Очевидно, это связано с тем, что суммарная интенсивность и время экспозиционного воздействия перечисленных антропогенных факторов превышает таковые для упомянутой температурной аномалии 2010 г.

2.2. Результаты оценки яркостного коэффициента асимметричности \bar{Y}_{GDF}

В отличие от вышерассмотренного параметра, \bar{Y}_{GDF} для мониторинга РЭС является новым. Поэтому результаты его оценки можно считать предварительными и справедливыми исключительно для листьев березы, произрастающей на исследованных в работе территориях. Из табл. 2 видно, что значение данного параметра на порядок превышает по величине \bar{Y}_G и существенно различаются по годам даже для одной и той же территории экомониторинга. Из чего следует, что асимметрия газоразрядного свечения верхних и нижних сторон листовых пластинок выражена значительно резче, чем ее геометрический аналог, а существенные годовые различия \bar{Y}_{GDF} подтверждают ранее полученный на проростках сои результат о тесной связи этого параметра с быстропотекающими физиологическими процессами функционирования растений в зависимости от условий внеш-

ней среды, включая и саму процедуру газоразрядного фотографирования [9, 10]. Поэтому достоверное определение \bar{Y}_{GDF} недопустимо на отделенных от материнского растения листовых пластинках, а время их газоразрядной экспозиции не должно превышать пределов обратимости электрофизиологической реакции на электрополевое воздействие и БГР [10], что в настоящих исследованиях составляло не более 0,1 с.

Как известно, формирование БГР коренным образом зависит от многих факторов, в частности, от концентрации водяных паров в газовой атмосфере. С их увеличением возрастает как яркость газоразрядного свечения, так и смещение максимума его спектра от фиолетовой до ближней ультрафиолетовой области [11]. К концентрационным градиентам паров воды также чувствительны и растения, что выражается, в частности, интенсивностью их транспирации. Основываясь на этих закономерностях можно попытаться объяснить обнаруженное уменьшение величины \bar{Y}_{GDF} в 2010 г. для листьев березы на исследованных территориях. В отличие от лета 2007 г., упомянутая высокотемпературная аномалия 2010 г. сопровождалась и длительным (более полутора месяцев) отсутствием осадков, что привело к неизбежному уменьшению тургорного давления в транспирационном аппарате листовых пластинок. Учитывая преимущественную интенсивность транспирации устьицами и их неодинаковое количество на верхней и нижней сторонах листьев, при фотографировании последних характер формирования разрядных каналов будет зависеть от содержания водяных паров в прилистовом пространстве, определяемого состоянием устьиц. Их переход от открытого к закрытому состоянию в засушливую погоду ведет к выравниванию градиента концентрации паров воды, что при ГРФМ верхней и нижней сторон листовых пластинок эквивалентно уменьшению асимметрии их газоразрядного свечения, наблюдаемого экспериментально. Как видно из табл. 2, наиболее активным этот процесс оказывается для листьев деревьев, произрастающих на территории Чистяковской рощи. Таким образом, одним из возможно выявляемых физиологических процессов с помощью яркостного коэффициента асимметричности \bar{Y}_{GDF} является транспирация. В заключение отметим, что условия зажигания БГР и спектр его излучения в рассмотренной методике ГРФМ указывают на возможность возбуждения флюорес-

ценции хлорофилла. Поэтому выявление его характерных полос в спектре газоразрядного свечения листьев позволит диагностировать и процессы фотосинтеза, значительно расширяя возможности ГРФМ, чему планируется посвятить дальнейшие исследования.

Обобщая результаты проведенных исследований, сделаем из них основные выводы:

1. Путем привлечения оптоэлектронных, аналого-цифровых и программных средств, а также электрополевых и плазменных технологий автоматизирована и усовершенствована методика биоиндикации окружающей среды, основанная на оценке флуктуирующей асимметрии листьев высших растений.

2. Для ее реализации разработано специальное оптоэлектронное устройство «Газоразрядно-цифровой электрофотоаппарат», позволяющее получать как электрополевые, так и газоразрядные изображения листовых пластинок одновременно с обеих сторон в реальном геометрическом и временном масштабе с последующей передачей и обработкой изображений с помощью специальной программы «GDF-Ecology». Причем процедура визуализации изображений предусматривает сохранение листьев на материнском растении.

3. Апробация усовершенствованной методики биоиндикации и разработанного для нее устройства — ГЦЭФ осуществлена на листьях *Betula pendula* Roth., произрастающей в городе Краснодаре на территориях, подвергаемых различным уровням и видам антропогенного воздействия. При этом показана возможность экспрессной оценки геометрического коэффициента асимметричности листьев \bar{Y}_G по их ГРИ, который дополнен новым параметром — яркостным коэффициентом асимметричности свечения листьев \bar{Y}_{GDF} . С помощью последнего удалось выявить реакцию РЭС на высокотемпературную аномалию, отмечавшуюся в Краснодарском крае летом 2010 г.

Литература

1. Мелехова О. П., Саранульцева Е. И., Евсеева Т. И. и др. Биологический контроль окружающей среды. Биоиндикация и биотестирование. М.: Академия, 2010. 288 с.
2. Захаров В. М., Зюганов В. В. К оценке асимметрии билатеральных признаков как популяционной характеристики // Экология. 1980. № 1. С. 10–16.
3. Захаров В. М., Шефтель Б. И., Александров Д. Ю. Нарушение стабильности развития на

- фазе пика численности в популяции млекопитающих // ДАН СССР. 1984. Т. 275. № 3. С. 761–764.
4. *Шестакова Г. А., Стрельцов А. Б., Константинов Е. Л.* Методика сбора и обработки материала для оценки качества среды (по березе повислой – *Betula pendula* Roth.). Калуга: КалужГПУ, 2000. 17 с.
 5. *Бойченко А. П.* О плазмopodobном состоянии биологической материи. М., 2006. 13 с. Деп. в ВИНТИ РАН 11.12.2006, № 1537–В2006.
 6. *Бараненко Ф. Ф., Бойченко А. П.* Автоматизация газоразрядно-фотографического мониторинга растительных экосистем // Матер. Всеросс. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых по физике. ДВГУ: Владивосток, 2007. С. 110–111.
 7. *Гераськина Н. П.* Определение устойчивости лесных экосистем методами биоиндикации на примере лесов Орловской области. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Калуга, 2007. 22 с.
 8. *Дружкина Т. А.* Скрининговая оценка экологического состояния городской среды по древесным культурам. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Астрахань, 2007. 22 с.
 9. *Бойченко А. П., Яковенко Н. А.* Плазменные процессы в растительных экосистемах и их газоразрядно-фотографический мониторинг // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2008. № 1. С. 62–73.
 10. *Бойченко А. П.* Газоразрядная фотография биологических объектов по методу Кирлиан – шестидесятилетний путь к истине // В книге В. Х. Кирлиан, С. Д. Кирлиан «В мире чудесных разрядов». Краснодар: Просвещение-Юг, 2009. С. 71–143.
 11. *Домород Н. Е., Кожаринов В. В., Храповицкий В. П., Черенкевич С. Н.* О влиянии влажности окружающей среды на характер электроразрядных процессов в коротких воздушных промежутках // Журн. техн. физики. 1987. Т. 57. Вып. 2. С. 264–267.

Ключевые слова: береза повислая, биоиндикация, геометрическая асимметрия листьев, яркостная асимметрия листьев, газоразрядно-фотографический мониторинг, газоразрядные изображения

Статья поступила 21 марта 2011 г.

Кубанский государственный университет, г. Краснодар

© Бойченко А. П., Кравченко А. А., Яковенко Н. А., 2011