

## БИОМЕХАНИКА

---

УДК 531/534

**Г.З. Клоян, М.А. Осипенко**

**G.Z. Kloyan, M.A. Osipenko**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

### **СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА ХВОИ СОСНЫ**

### **STATISTICAL ANALYSIS OF MEASUREMENTS FLUORESCENCE OF CHLOROPHYLL PINE NEEDLES**

Представлен статистический анализ измерений флуоресценции хлорофилла сосны обыкновенной в особо охраняемой природной территории «Черныяевский лес». Исследование проводилось с помощью аппарата флуориметр «Фотон-10». Были получены экспериментальные данные, по которым оценивалась степень воздействия выбросов в атмосферу на лесные насаждения. На основе полученных данных выдвинута гипотеза, что случайная величина является композицией трех нормально распределенных величин. Результаты исследования показывают, качественную, а в ряде случаев количественную приемлемость представления об измеряемой случайной величине относительного показателя замедленной флуоресценции (ОПЗФ) как о композиции трех нормально распределенных случайных величин.

**Ключевые слова:** фотосинтез, относительный показатель замедленной флуоресценции, Черныяевский лес, статистический анализ, метод наименьших квадратов.

In this article, a statistical analysis of the measurements of the chlorophyll fluorescence of Scots pine in the specially protected natural area «Chernyaevsky Forest» was carried out. The study was carried out using the apparatus «Foton-10» fluorimeter. Experimental data were obtained, according to which the degree of impact of air emissions on forest stands was estimated. Based on the data obtained, a hypothesis has been put forward that a random variable is a composition of three normally distributed variables. The results of the study show the qualitative, and in some cases quantitative, acceptability of the concept of the measured random value of the relative delayed fluorescence index (RFRF) as a composition of three normally distributed random variables.

**Keywords:** photosynthesis, relative index of delayed fluorescence, Chernyaevsky forest, statistical analysis, least squares method.

### **Введение**

Одной из актуальных экологических проблем городов является увеличение выбросов автотранспорта в атмосферу. Это приводит к нарушению биотического круговорота, наносит ущерб фауне, флоре, здоровью населения,

снижает продуктивность и устойчивость природных и природно-антропогенных экосистем [1].

Развитие жизни на Земле во многом определяется присутствием на нашей планете растений. Они поддерживают уровень кислорода в атмосфере и превращают неорганические вещества в органические, способствуя тем самым эволюции. Однако развитие цивилизации сопровождается увеличением влияния антропогенного фактора на окружающую природную среду. В этих условиях важными задачами являются более детальное изучение структурно-функциональной организации фотосинтетического аппарата растений, а также усовершенствование техники биомониторинга [2].

Целью данной работы является получение статистического анализа случайной величины относительного показателя замедленной флуоресценции (ОПЗФ).

### **Фотосинтез и флуоресценция хлорофилла**

Фотосинтетический аппарат, имеющий огромную поверхность контакта со средой в первую очередь и в наибольшей степени подвергается неблагоприятным воздействиям загрязнения среды. Преимущество флуоресцентных методов заключается в том, что информацию о содержании хлорофилла, организации фотосинтетического аппарата и его активности можно получить за очень короткий отрезок времени, как при контактном, так и бесконтактном способах измерения, что очень важно для решения экологических проблем [3].

Фотосинтез – стабильное фундаментальное явление, поэтому снижение его интенсивности свидетельствует об ухудшении состояния растения. Флуоресценция выступает как инструмент исследования фотосинтеза [4].

Характер изменения первичных стадий фотосинтеза непосредственно отражается в изменении флуоресценции хлорофилла в фотосинтетических мембранах клеток. Поглощение кванта света переводит молекулу хлорофилла в электронное возбужденное состояние, энергия которого в растворе при отсутствии фотосинтеза переходит либо в тепло, либо в флуоресценцию [4].

Одним из методов определения состояния природной среды является метод регистрации замедленной флуоресценции (ЗФ) хлорофилла.

Явление замедленной флуоресценции состоит в том, что после светового возбуждения в фотосинтезирующих клетках наблюдается слабое, длительно затухающее свечение, испускаемое хлорофиллом. Это свечение возникает за счет энергии, выделяемой в ходе темновых реакций первичных фотопродуктов фотосинтеза в реакционных центрах. Тем самым по показателю замедленной флуоресценции хлорофилла можно оценить изменения работы фотосинтетического аппарата растительного организма, происходящие под воздействием различного рода факторов [5].

Метод регистрации замедленной флуоресценции хлорофилла у таких древесных пород, как сосна обыкновенная, обеспечивает надежное выявление начальных стадий повреждения растений при загрязнении атмосферы [6].

Для измерения параметров фотосинтетического аппарата живых организмов в Сибирском федеральном университете разработан специализированный прибор – флуориметр «Фотон10». В приборе реализован метод регистрации относительного показателя замедленной флуоресценции – ОПЗФ. Он заключается в том, что измерение свечения каждой кюветы проводится для двух заранее установленных световых и временных режимов, условно обозначенных как «режим высокого света» и «режим низкого света» [5].

Оценка степени трансформации экосистем по флуоресценции хлорофилла является наиболее перспективной и легкой в использовании.

### Материал и методика

Исследование проводилось на территории 2-го квартала Черняевского леса (рис 1). Было заложено 7 пробных площадок и отобрано 24 пробы хвои сосны обыкновенной. На территории был определен относительный показатель замедленной флуоресценции хлорофилла (далее ОПЗФ) сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Измерения проводились согласно «Методике регистрации замедленной флуоресценции хлорофилла при биоиндикации загрязнения воздушной среды на хвойных». Измерения проводились при помощи флуориметра «Фотон-10».



Рис. 1. Пробные площадки на территории 2-го квартала Черняевского леса

Экспериментальные данные – значения по относительному показателю замедленной флуоресценции на пробной площадке 1 за 19.06.2018 г. представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения по относительному показателю замедленной флуоресценции на пробной площадке 1 за 19.06.2018 г.

Номер кюветы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ОПЗФ, отн. ед.	4,2	4,1	4,0	4,6	4,4	4,5	4,5	4,5	4,4	4,2	4,5	4,3
Номер кюветы	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ОПЗФ, отн. ед.	4,0	4,0	4,2	4,1	4,6	3,9	4,0	4,2	4,2	4,0	4,3	4,2

По этой таблице можно найти эмпирическую плотность распределения этой случайной величины и сравнить эту плотность с нормальной.

Таким образом, было выявлено, что плотность рассматриваемой случайной величины во всех примерах не является нормальной.

Качественное рассмотрение приведенных графиков позволяет предположить, что случайная величина является композицией трех нормально распределенных величин в том смысле, что плотность

$$y(x) = p_1 y_1(x) + p_2 y_2(x) + p_3 y_3(x), \quad (1)$$

где  $y_m(x)$  – плотность каждой из трех компонент,  $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ . Каждую  $y_m(x)$  считаем нормальной:

$$y_m(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \exp\left(-\frac{(x-\mu_m)^2}{2\sigma_m^2}\right). \quad (2)$$

Далее находим

$$p_1\mu_1 + p_2\mu_2 + p_3\mu_3 = \mu; \quad (3)$$

$$p_1(\mu_1^2 + \sigma_1^2) + p_2(\mu_2^2 + \sigma_2^2) + p_3(\mu_3^2 + \sigma_3^2) = \sigma^2 + \mu^2. \quad (4)$$

При заданных  $\mu_m$  и  $\sigma_m$  можно, следовательно, найти  $p_m$ . Величины  $\mu_m$  и  $\sigma_m$  можно находить методом наименьших квадратов так, чтобы теоретическая плотность наиболее точно соответствовала точкам эмпирической плотности. Результаты приведены на рис. 2–8.

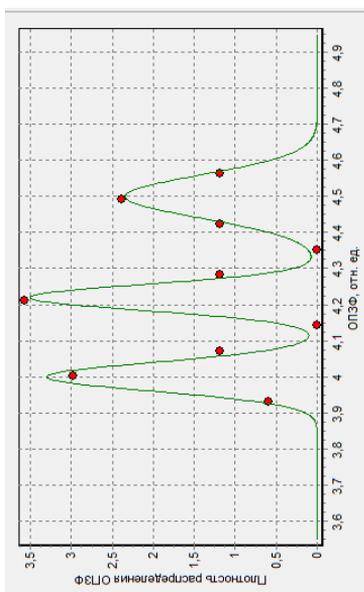


Рис. 2. Плотность распределения ОПЗФ на 1-й пробной площадке

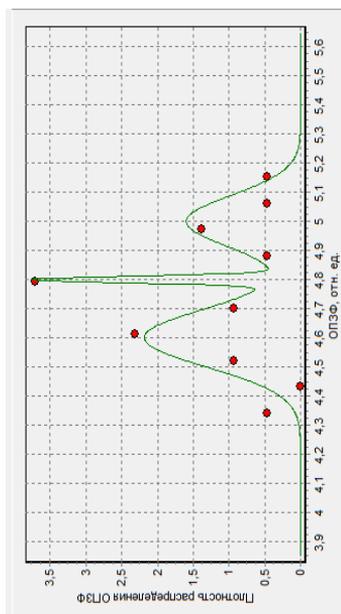


Рис. 4. Плотность распределения ОПЗФ на 3-й пробной площадке

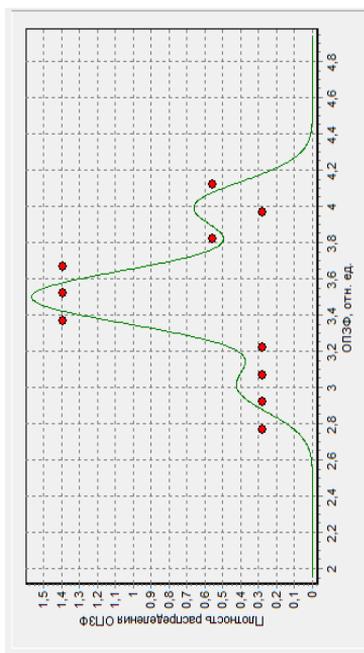


Рис. 3. Плотность распределения ОПЗФ на 2-й пробной площадке

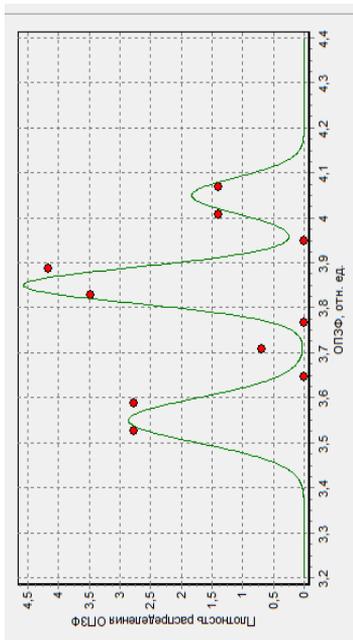


Рис. 5. Плотность распределения ОПЗФ на 4-й пробной площадке

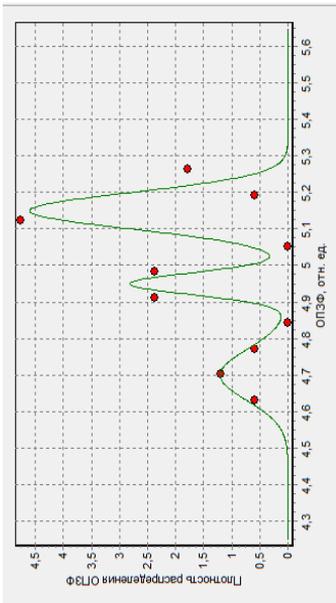


Рис. 6. Плотность распределения ОПЗФ на 5-й пробной площадке

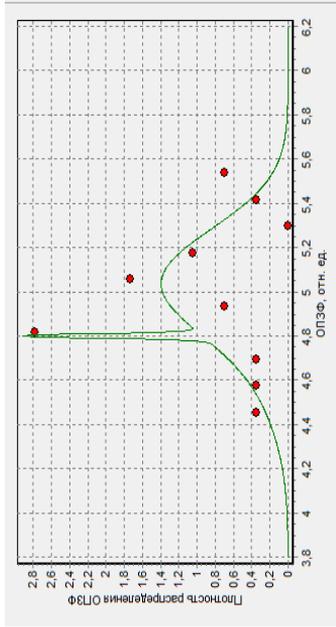


Рис. 7. Плотность распределения ОПЗФ на 6-й пробной площадке

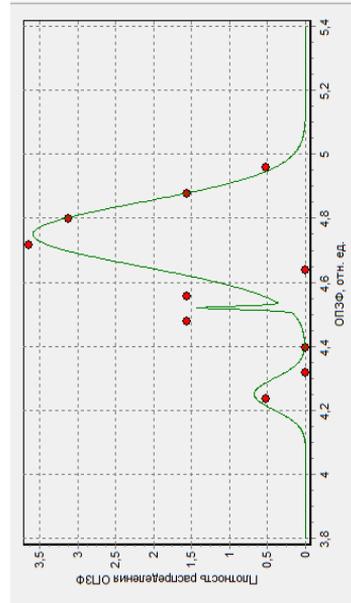


Рис. 8. Плотность распределения ОПЗФ на 7-й пробной площадке

Полученные результаты показывают качественную, а в ряде случаев количественную приемлемость представления об измеряемой случайной величине (ОПЗФ) как о композиции трех нормально распределенных случайных величин.

### Заключение

С развитием цивилизации увеличивается влияние антропогенных факторов на окружающую природную среду. В этих условиях важными задачами являются более детальное изучение структурно-функциональной организации фотосинтетического аппарата растений, а также усовершенствование техники биомониторинга.

Одним из методов, способных давать оперативную информацию о физиологическом состоянии фотосинтетического аппарата, является регистрация различных параметров флуоресценции хлорофиллсодержащих растений.

Одним из методов определения состояния природной среды является метод регистрации замедленной флуоресценции (ЗФ) хлорофилла.

Исследование проводилось во 2-м лесном квартале ООПТ «Черняевский лес».

ОПЗФ, измеренный в различных кюветах, рассматривался как случайная величина.

Установлено, что плотность этой случайной величины не является нормальной. Предложено представление случайной величины как композиции трех нормально распределенных величин. Это представление подтверждается экспериментальными данными.

### Список литературы

1. Изучение параметров флуоресценции хлорофилла древесных растений в условиях различной транспортной нагрузки / М.Ю. Алиева, А.Т. Маммаев, М.Х.-М. Магомедов, Е.В. Пиняскина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 1-3. – С. 701–704.

2. Оценка состояния хвойных пород в зоне действия атмосферных загрязнителей по структурно-функциональным показателям хвои / Р.О. Собчак, Т.П. Астафурова, Т.А. Зайцева, Г.С. Верхотурова, А.П. Зотикова, О.Н. Дегтярева // Krylovia. Сибирский ботанический журнал. – 2001. – Т. 3, № 2. – С. 114–121.

3. Соболевская Ю.В., Жигула Ю.С. Особенности зимнего покоя разновозрастной хвои сосны обыкновенной и ели сибирской [Электронный ресурс] // Молодёжь и наука: сб. материалов VII всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 50-летию первого полета чело-

века в космос. – Красноярск: Изд-во Сиб. федер. ун-та. – 2011. – URL: [http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2011/thesis/s14/s14\\_73.pdf](http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2011/thesis/s14/s14_73.pdf).

4. Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла: теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений / В.Н. Гольцев, М.Х. Каладжи, М.А. Кузманова, С.И. Аллахвердиев. – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. – 220 с.

5. Состояние и охрана окружающей среды. Ч. 2. [Электронный ресурс]. – Пермь, 2011. – 45 с. – URL: <http://www.gorodperm.ru/upload/>.

6. Григорьев Ю.С. Андреев Д.Н. К вопросу о методике регистрации замедленной флуоресценции хлорофилла при биоиндикации загрязнения воздушной среды на хвойных // Естественные науки. – 2012. – № 2(39). – С. 36–39.

Получено 12.10.2021

**Клоян Гаянэ Зурабиевна** – магистр, факультет прикладной математики и механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: [kloyang@mail.ru](mailto:kloyang@mail.ru)

**Осипенко Михаил Анатольевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: [osipenko.michael@yandex.ru](mailto:osipenko.michael@yandex.ru).