

Shrubland and Savanna Ecosystems. Vol. 1–2 / J. E. Herrick [et al.] / USDA – ARS Jornada Experimental Range Las Cruces, New Mexico. – 2005. – 237 p.

9. Mitchel, W. A. Point sampling: Section 6.2.1., U.S. Army Corps of Engineers Wildlife Resources Management Manual / W. A. Mitchel, G. Hughes // Technical Report EL-95-25, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. – 1995. – 38 p.

10. A Laser Point Frame to Measure Cover / L. K. Van Amburg [et al.] // Rangeland Ecol. Manage. – 2005. – Vol. 58. – P. 557–560.

11. Бузук, Г. Н. Уровни точности учета проективного покрытия при использова-

нии линий точек (line point method) и линий пересечения (line intercept method) / Г. Н. Бузук // Вестник фармации. – 2013. – № 4. – С. 12–17.

Адрес для корреспонденции:

210023, Республика Беларусь,
г. Витебск, пр. Фрунзе, 27,
УО «Витебский государственный
ордена Дружбы народов
медицинский университет»,
кафедра фармакогнозии
с курсом ФПК и ПК,
тел. раб.: 8(0212) 37-09-29,
Бузук Г. Н.

Поступила 26.01.2015 г.

Н. А. Кузьмичева¹, Ю. А. Кузьмичев²

ХАРАКТЕР ЗАВИСИМОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ФЛАВОНОИДОВ В РАСТЕНИЯХ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНОПОПУЛЯЦИИ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ РЯДУ

¹Витебский государственный орден Дружбы народов медицинский университет

²Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

Предложены математические функции, аппроксимирующие обнаруженную ранее М-образную зависимость содержания флавоноидов в листьях растений от положения ценопопуляции в экологическом ряду на естественных склонах. Для полного экологического ряда она может быть представлена суммой двух функций Гаусса с разными значениями ее параметров. Для фрагментов экологического ряда допустимо использовать полиномиальные функции 3–5 порядка.

Ключевые слова: экологический ряд, флавоноиды, функция Гаусса, полиномиальные функции.

ВВЕДЕНИЕ

Содержание веществ вторичного синтеза в растениях одного вида может значительно различаться. Это обусловлено как генетическими, так и экологическими факторами [1]. Традиционно для изучения влияния факторов сравнительному анализу подвергают образцы каких-либо органов растений, заготовленные в двух–трех местообитаниях, различающихся интенсивностью, как правило, не только изучаемого фактора. На наш взгляд, этого явно недостаточно, чтобы оценить уровень изменчивости химического состава растений, разработать научно обоснованные рекомендации по сбору лекарственного растительного сырья и учитывать их при

заготовке в промышленных масштабах для получения сырья высокого качества [2–5].

Экологические факторы в природных условиях действуют не изолированно друг от друга, а в виде сложного комплекса. Это в значительной степени затрудняет исследования влияния отдельных факторов на процессы жизнедеятельности в живых организмах, поскольку очень трудно найти в природе такой экологический ряд, где нарастал бы только один экологический фактор при неизменных других. Однако довольно часто можно выделить экологические ряды фитоценозов, располагающихся на естественных склонах в определенном порядке, соответствующем толерантности видов к ключевому фактору – влажности почвы. На склоне

наибольшая сухость почвы наблюдается в верхней части склона, а наименьшая – в нижней, соответственно, виды растений распределяются от более к менее сухолюбивым [6]. Иногда в таком ряду выделяют до 10 и более ассоциаций, причем их видовой состав может значительно различаться, но в составе каждой из них нередко присутствует какой-либо один и тот же эврибионтный вид.

Именно такие экологические ряды являются наиболее удобными для изучения характера зависимости содержания действующих веществ (как правило, веществ вторичного синтеза) в лекарственных растениях от экологических факторов. В качестве модельных растений в таких исследованиях должны выступать виды с повышенной экологической пластичностью, диапазон толерантности которых в идеале соответствовал бы диапазону колебаний влажности почвы на конкретном склоне [7, 8].

При экологических исследованиях в последнее время широко используется метод математического моделирования. Математические уравнения дают возможность формально определить взаимодействие различных компонентов экологических систем. Математические модели являются неполным абстрактным отображением реального мира, но без них трудно уловить общий смысл реальной модели [6].

Ранее сформулирована и доказана на примере минерального питания растений и накопления в них алкалоидов универсальная М-образная зависимость между основным и специализированным обменом у лекарственных растений [2]. Нами расширены условия применения данной зависимости на другие вещества вторичного синтеза (флавоноиды, дубильные вещества, эфирное масло) и другие экологические факторы (как эдафические, так и климатические) [3–5]. Показано, что зависимость содержания вторичных соединений от различных экологических факторов чаще всего имеет двухвершинный М-образный характер с двумя более или менее выраженными максимумами накопления и прогибом между ними. В качестве математической модели предложены полиномиальные функции 3–5 степени. Это не является корректным для биологических объектов, находящихся в условиях пессимума, хотя позволяет более нагляд-

но показать характер зависимостей, особенно если изучались не полные экологические ряды, а их фрагменты.

Целью настоящего исследования явился поиск математической функции, с наибольшей достоверностью аппроксимирующей закономерности зависимости содержания вторичных соединений в растениях от экологических условий их мест обитания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов для исследования нами выбраны брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L.), лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.s.l.) и земляника лесная (*Fragaria vesca* L.). Эти виды имеют широкие пределы толерантности к экологическим факторам, таким как освещенность, влажность и богатство почвы, рН почвенного раствора, содержание в нем доступных форм фосфора и т.д.

Листья брусники обыкновенной заготавливали в естественных фитоценозах в Ушачском районе Витебской области. Были изучены 10 ценопопуляций *V. vitis-idaea* на эколого-ценотическом градиенте от коренного берега юго-западной части оз. Должина до уреза воды по склону, на котором прослеживались три террасы [7].

Цветки лабазника вязолистного заготовлены в естественных фитоценозах в окрестностях д. Малые Летцы Витебского района Беларуси. Экологический ряд включал 10 ценопопуляций *Fulmaria* на склоне от коренного берега р. Шевинка (бассейн р. Западная Двина) до русла реки. Из них пять ценопопуляций произрастали в пойме (пойменный тип увлажнения) и пять – на надпойменной террасе (супераквальный и элювиально-аккумулятивный тип увлажнения) [8].

Листья земляники лесной заготовлены в окрестностях г. Гродно на естественном склоне коренного берега к пойме р. Неман. Из 15 изученных ценопопуляций 5 произрастали в пойме, остальные – на надпойменной террасе.

В каждой из изученных ценопопуляций взяты по 4 образца сырья. Сушка воздушно-тенивая. Количественное содержание суммы флавоноидов определяли спектрофотометрическим методом с использованием реакции комплексообразо-

вания производных флавонола и флавонола с алюминия хлоридом в среде ацетатного буферного раствора с рН=3 в пересчете на гликозиды кверцетина [7, 8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определено, что содержание флавоноидов в листьях брусники изменяется от 1,28% до 1,96%, в листьях земляники – от 1,73% до 3,01%. В цветках лабазника содержание флавоноидов выше – от 3,3% до 5,8%. Размах вариабельности для брусники сравнительно небольшой, поскольку все изученные ценопопуляции находятся

в одном лесном массиве, и их флористический состав изменяется по склону незначительно. Для земляники и лабазника уровень изменчивости заметно выше, как и разнообразие видов, составляющих ценопопуляции (таблица).

Оценить характер влияния комплекса экологических условий можно, представив полученные данные в виде графиков (рисунки 1–3).

Зависимость содержания флавоноидов в исследуемых образцах сырья от условий местообитаний выражается в виде двухвершинной кривой. Один из максимумов этой кривой находится на уровне 3–4 це-

Таблица – Содержание флавоноидов в растениях из ценопопуляций на склонах

№ ценопопуляции	Содержание флавоноидов, %			Направление повышения уровня экотопа
	Листья брусники	Цветки лабазника	Листья земляники	
1	1,55±0,01	3,6±0,11	2,81±0,06	↓
2	1,65±0,04	3,9±0,06	2,74±0,07	
3	1,84±0,02	4,1±0,04	2,99±0,03	
4	1,52±0,04	4,9±0,04	3,01±0,04	
5	1,55±0,01	5,8±0,04	2,98±0,07	
6	1,70±0,01	4,2±0,03	2,86±0,06	
7	1,96±0,11	3,3±0,03	2,58±0,07	
8	1,53±0,13	3,6±0,03	2,45±0,04	
9	1,35±0,08	5,4±0,01	1,94±0,09	
10	1,28±0,15	4,0±0,02	2,33±0,05	
11			2,70±0,03	
12			2,83±0,06	
13			2,86±0,02	
14			2,73±0,08	
15			1,73±0,07	

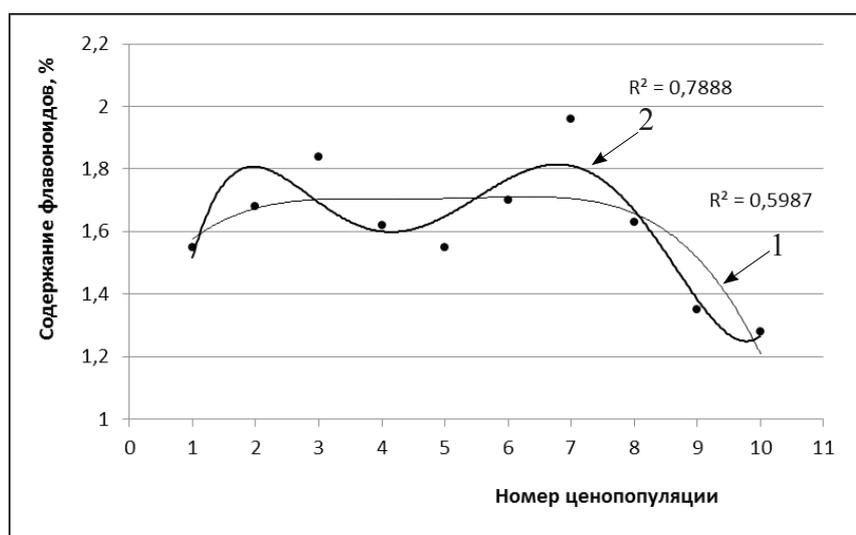


Рисунок 1 – Содержание суммы флавоноидов в листьях брусники (аппроксимирующие кривые: 1 – полином 4 степени; 2 – полином 5 степени)

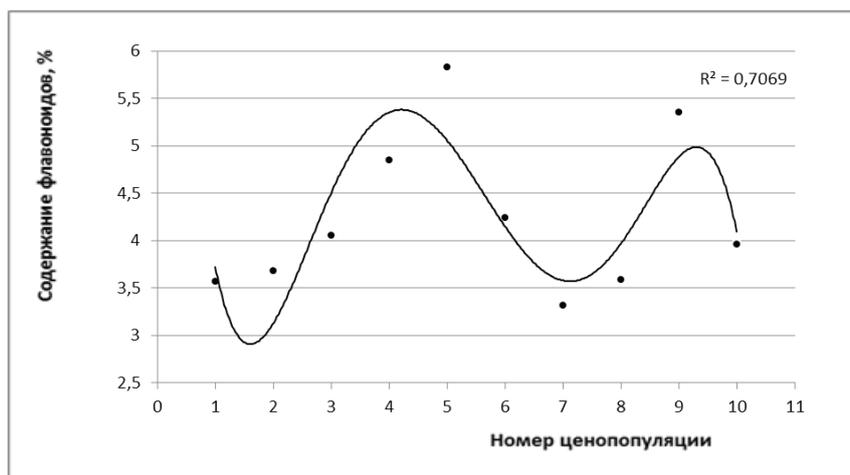


Рисунок 2 – Содержание суммы флавоноидов в цветках лабазника (аппроксимирующая кривая – полином 5 степени)

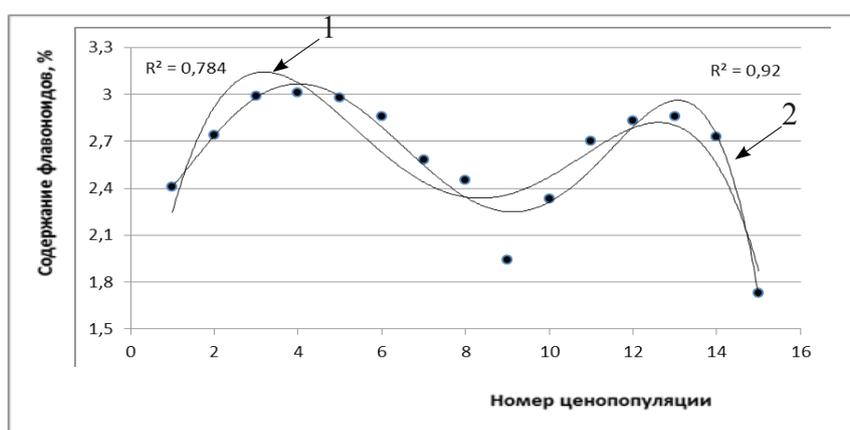


Рисунок 3 – Содержание суммы флавоноидов в листьях земляники (аппроксимирующие кривые: 1 – полином 4 степени; 2 – полином 5 степени)

нопопуляции для всех изученных видов, положение второго различно у разных видов – от 7 до 14 ценопопуляции вверх по склону. По степени выраженности они почти равнозначны. Между максимумами наблюдается прогиб кривой, наиболее выраженный для листьев земляники. Он соответствует оптимальным условиям для роста растений, что выражается большими размерами побегов и листьев, чем в ценопопуляциях, удаленных от оптимума.

Полиномы 4 и 5 степени (кривые 1 и 2 соответственно на рисунках 1 и 3) не вполне адекватно аппроксимируют полученные результаты, особенно в районе пессимумов (ценопопуляции №1 и 2 брусники и лабазника). Полином 4 степени оказался непригодным для описания зависимости содержания флавоноидов от экологических условий в цветках

лабазника (рисунок 2). Попытка исключения из анализа ценопопуляции брусники №10 не привела к улучшению достоверности аппроксимации для обеих полиномиальных функций ($R^2 = 0,72-0,73$) (рисунок 4), причем они практически совпадают.

При уменьшении количества ценопопуляций до 7 (рисунок 5) коэффициент корреляции между вычисленными и экспериментальными данными увеличивается до 0,87 для полиномов 3 и 4 степени (на рисунке 5 они совпадают) и до 0,978 для полинома 5 степени.

Таким образом, полиномы пригодны в качестве аппроксимирующих функций только для фрагментов экологических рядов. Для изучения рядов ценопопуляций, охватывающих всю или почти всю экологическую амплитуду вида, очевидно,

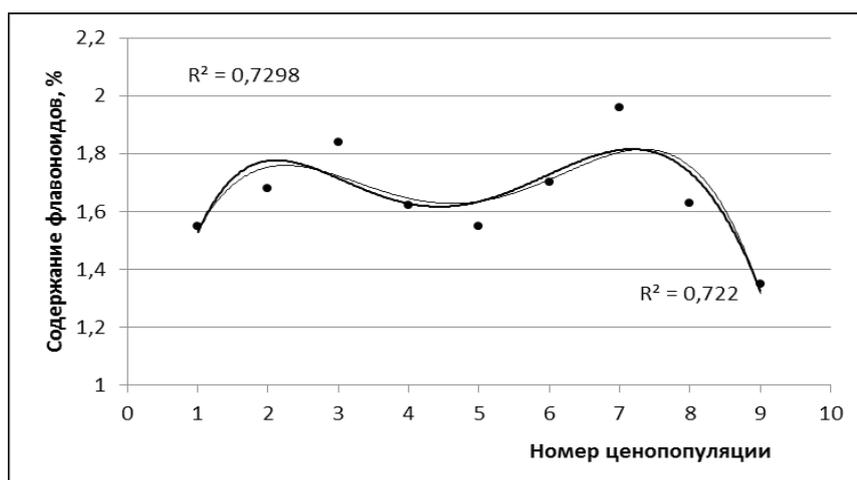


Рисунок 4 – Содержание суммы флавоноидов в листьях брусники из ценопопуляций 1–9, расположенных на склоне берега озера (аппроксимирующие кривые: полиномы 4 и 5 степени)

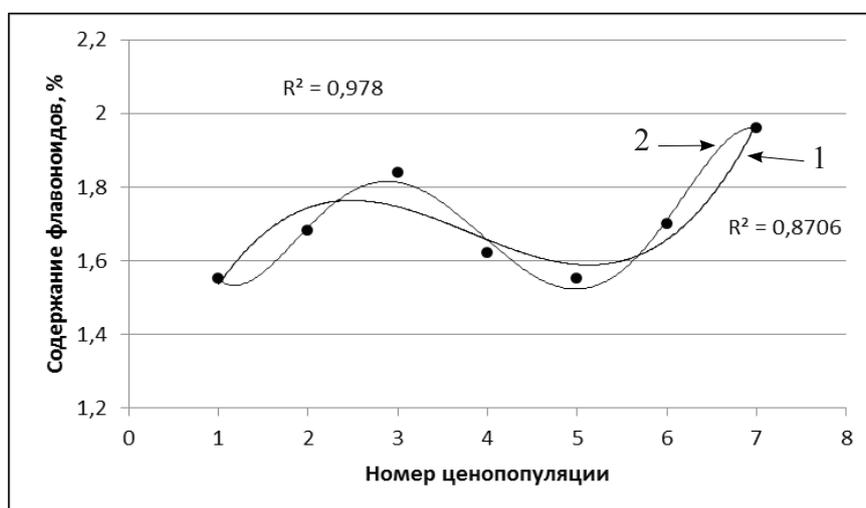


Рисунок 5 – Содержание суммы флавоноидов в листьях брусники из ценопопуляций 1–7, расположенных на склоне берега озера (аппроксимирующие кривые: 1 – полином 3 и 4 степени; 2 – полином 5 степени)

нужно применять другие математические функции.

Наибольший биологический смысл имеет функция Гаусса, которая очень хорошо описывают изменчивость размерных характеристик достаточно больших выборок разнообразных биологических объектов на популяционном и более высоких уровнях. График функции Гаусса имеет форму колокола. Его называют нормальной кривой или кривой Гаусса. Поскольку нормальному закону подчиняются многие явления, подверженные влиянию значительного числа независимых факторов, а именно к таким можно отнести изменчивость количественного со-

держания вторичных соединений, логично взять за основу именно эту функцию, которая выражается формулой (1):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где μ и σ – параметры, определяющие вид кривой Гаусса.

Эта функция имеет один максимум. Для того, чтобы описать полученную экспериментально функциональную зависимость, предлагается использовать сумму двух функций Гаусса с разными значени-

ями параметров μ и σ . Общая формула (2) будет выглядеть следующим образом:

$$f(x) = \frac{k_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{k_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} + k_3, \quad (2)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, значения которых определяются по экспериментальным данным.

Применительно к содержанию флавоноидов в листьях брусники на эколого-ценотическом градиенте она приобретет вид (3):

$$f(x) = \frac{2,8}{1,55\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-3)^2}{4,81}} + \frac{3,7}{0,95\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-7)^2}{1,81}} + 1,25, \quad (3)$$

где $k_1 = 2,8; k_2 = 3,7; k_3 = 1,25; \mu_1 = 3; \sigma_1 = 1,55; \mu_2 = 7; \sigma_2 = 0,95$.

График полученной функции и величина достоверности аппроксимации с экспериментальными данными представлены на рисунке 6.

Очевидно, что предложенная функция вполне корректно отображает реально существующую закономерность распределения по склону ценопопуляций брусники с различным содержанием флавоноидов в листьях. Аналогичным образом рассмотрим возможность применения этой функции к другим биологическим объектам.

На основании экспериментальных данных о содержании суммы флавоноидов в цветках лабазника и листьях земляники получены следующие формулы: (4) для цветков лабазника и (5) для листьев земляники. Их графики представлены на рисунках 7 и 8.

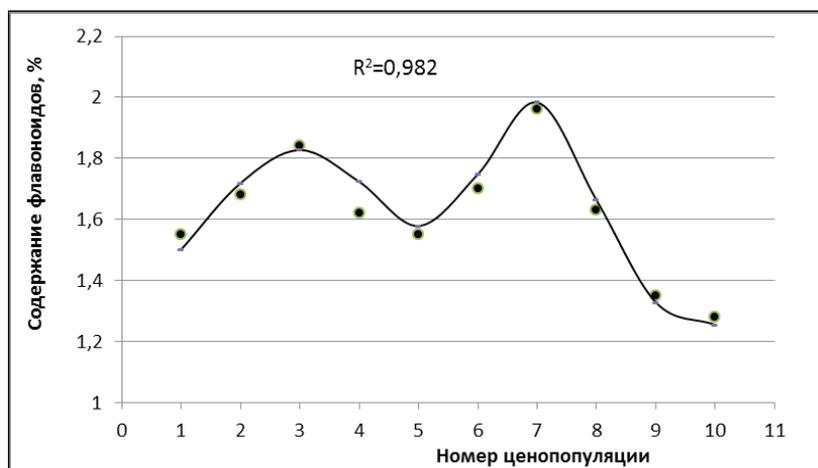


Рисунок 6 – Содержание суммы флавоноидов в листьях брусники на эколого-ценотическом градиенте

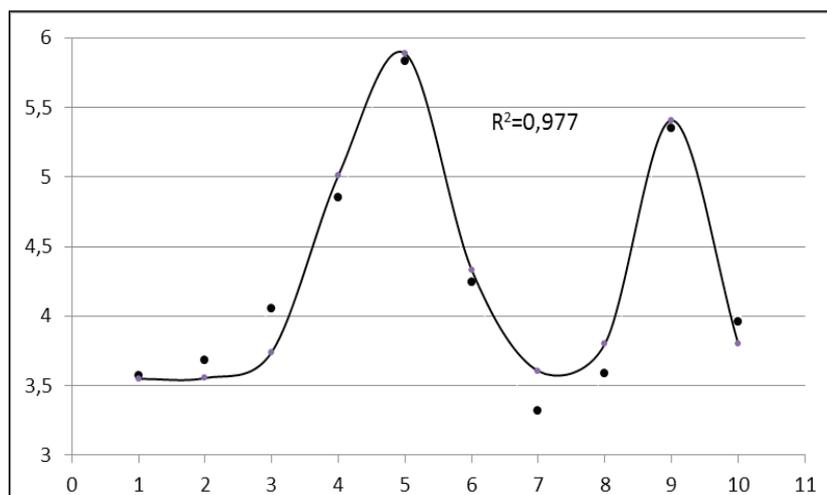


Рисунок 7 – Содержание суммы флавоноидов в цветках лабазника на эколого-ценотическом градиенте

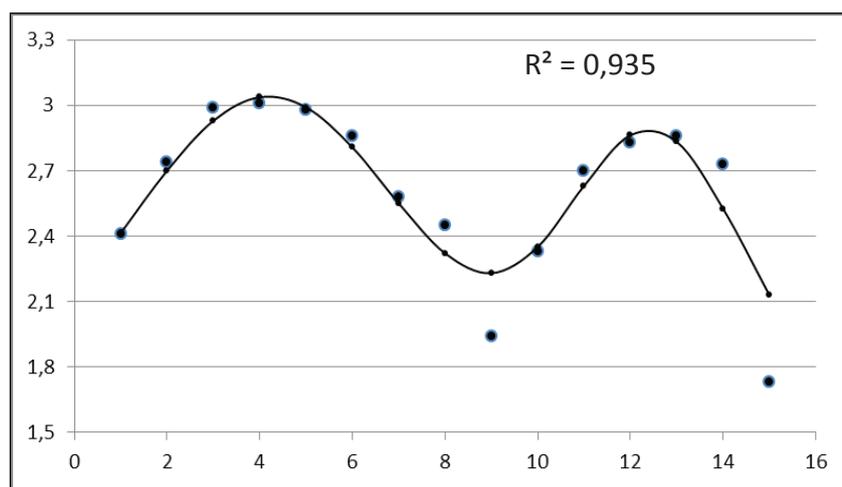


Рисунок 8 – Содержание суммы флавоноидов в листьях земляники на эколого-ценотическом градиенте

$$f(x) = \frac{0,58}{3\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-4,2)^2}{18}} + \frac{1,05}{1,9\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-12,5)^2}{7,22}} + 1,6, \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{1,3}{0,8\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-4,8)^2}{1,28}} + \frac{2,7}{0,5\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-9)^2}{0,5}} + 3,55, \quad (5)$$

Коэффициент корреляции экспериментальных и вычисленных по формулам (3), (4) и (5) данных намного выше, чем в случае использования в качестве аппроксимирующих кривых полиномиальных функций, что говорит о более адекватном отображении закономерности накопления флавоноидов с помощью математических функций, основанных на нормальном распределении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формулу (2), представленную в виде суммы двух функций Гаусса с разными значениями параметров μ и σ , можно предложить в качестве математической функции, аппроксимирующей закономерности содержания флавоноидов в растениях в зависимости от изменения комплекса экологических факторов на естественных склонах. Если экспериментальные данные не полностью охватывают экологическую широту изучаемого вида, для аппроксимации полученной зависимости допустимо использовать полиномиальные функции 3–5 порядка.

SUMMARY

N. A. Kuzmichova, Y. A. Kuzmichov
DEPENDENCE FORMAT OF THE
FLAVONOIDS CONTENTS IN PLANTS
FROM THE COENOPOPULATION
POSITION IN AN ECOLOGICAL ROW

The mathematical functions approximating recently discovered the M-shaped dependence of the flavonoids contents in plants from the position of a coenopopulation in an ecological row on natural slopes were offered. For a complete ecological row it can be represented by the sum of two Gaussian functions with different values of parameters. For fragments of an ecological row it is acceptable to use 3–5 degree polynomial functions.

Keywords: ecological row, flavonoids, Gaussian function, polynomial functions.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баяндина, И. И. Экологические условия и накопление фенольных соединений в лекарственных растениях / И. И. Баяндина, Ю. В. Загурская // Лекарственные растения: фундаментальные и прикладные проблемы: материалы I Международной конференции (21–22 мая 2013 г., г. Новосибирск) / Новосиб. гос. аграр. ун-т. – Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2013. – С. 130–135.

2. Бузук, Г. Н. Универсальный характер M-образной зависимости между основным и специализированным обменом у лекарственных растений / Г. Н. Бузук,

М. Я. Ловкова, С. М. Соколова // Вестник фармации. – 2006. – №1. – С. 23–33.

3. Кузьмичева, Н. А. Влияние климатических и эдафических факторов на содержание флавоноидов в листьях *Salix sp.* / Н. А. Кузьмичева, Г. Н. Бузук // Материалы VII съезда фармацевтов Республики Беларусь «Фармация XXI века». – Витебск. – 22 октября 2004 г. – С. 262–264.

4. Кузьмичева, Н. А. Влияние климатических факторов на содержание флавоноидов в листьях пойменных видов ив (*Salix L.*) / Н. А. Кузьмичева // Вестник фармации. – 2009. – №4. – С. 21–32.

5. Созинов, О. В. Ресурсно-фитохимический оптимум заготовки лекарственного растительного сырья / О. В. Созинов, Н. А. Кузьмичева, Г. Н. Бузук // Современная ботаника в России. Труды XIII съезда Русского ботанического общества и конференции «Научные основы охраны и рационального использования растительного покрова Волжского бассейна» (Тольятти, 16–22 сентября 2013). Т. 3. Тольятти: Кассандра. – 2013. – С. 89–90.

6. Радкевич, В. А. Экология: Учебник / В. А. Радкевич. – Мн.: Высшая школа, 1997. – С. 19, 25.

7. Кузьмичева, Н. А. Содержание арбутина и других фенольных соединений в листьях брусники (*Vaccinium vitis-idaea L.*) на эколого-ценотическом градиенте / Н. А. Кузьмичева // Материалы VIII съезда фармацевтических работников Республики Беларусь / Сборник. – Витебск, 2010. – С. 218–222.

8. Созинов, О. В. Содержание флавоноидов в соцветиях *Filipendula ulmaria (L.) Maxim.S. L.* на эколого-ценотическом градиенте / О. В. Созинов, Н. А. Кузьмичева // Материалы докладов XV Коми республиканской молодежной научной конференции. – Сыктывкар, 2004. – Т. II. – С. 149–150.

Адрес для корреспонденции:

210023, Республика Беларусь,
г. Витебск, пр. Фрунзе, 27,
УО «Витебский государственный
ордена Дружбы народов
медицинский университет»,
кафедра фармакогнозии
с курсом ФПК и ПК,
тел. раб.: 8(0212) 37-09-29,
Кузьмичева Н. А.

Поступила 09.01.2015 г.