

ФАРМАКОГНОЗИЯ И БОТАНИКА

УДК 678.019.38:574.01

DOI: <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2023.3.19>

Г. Н. Бузук

2D НЕПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ (KERNEL) РЕГРЕССИЯ В АНАЛИЗЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ С ПОМОЩЬЮ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ШКАЛ Н. ELLENBERG

г. Витебск, Республика Беларусь

В результате проведенных исследований разработана программа в среде Matlab для оценки экологического пространства растительных сообществ с помощью 2D-непараметрической (kernel) регрессии. На примере анализа экологического пространства сосняка долгомошного с применением объединенных Европейских экологических шкал Н. Ellenberg, выявлено наличие в некоторых сообществах локальных группировок, обусловленных компонентами нанорельефа. Локализация и выраженность максимумов плотности вероятности может варьировать в зависимости, например, от географического происхождения сообщества. Отмечены проблемные вопросы использования экологических шкал для оценки экологического пространства растительных сообществ и необходимость дальнейших исследований в этом направлении. В первую очередь это связано с неполнотой экологических шкал. В целом же использование 2D-непараметрической (kernel) регрессии при оценке экологического пространства сообществ с помощью экологических шкал дает новые возможности в познании экологии растительных сообществ и составляющих их видов.

Ключевые слова: экологические шкалы Н. Ellenberg, непараметрическая (kernel) регрессия, экологическое пространство растительных сообществ.

ВВЕДЕНИЕ

Определение экологических условий в местообитаниях растений, в том числе и лекарственных, представляет довольно сложную задачу в силу комплексности многих экологических факторов, например, трофности, и также их высокой пространственной и временной изменчивости. В связи с этим в настоящее время достаточно широко используются экологические шкалы, которые позволяют получать обобщенные и усредненные характеристики экологических режимов в силу определенной инерции в ответной реакции состава сообщества на изменение тех или иных параметров среды [1–9].

В последние годы разработан новый вариант экологических шкал Н. Ellenberg (ETIV – Ellenberg-type indicator values) на основе региональных шкал 13 стран Европы [10].

Особенностью этих шкал, в отличие от предложенных ранее, является наличие оптимума и диапазона толерантности (широты ниши) для основных экологи-

ческих факторов, таких как освещенность (Light), увлажнение (Moisture), температура (Temperature), кислотность (Reaction), засоленность (Salinity) и трофность (Nutrients) почвы. Одновременное присутствие оптимумов и диапазона толерантности (широты ниши) позволяет использовать различные методы и способы расчета параметров экологического пространства.

Ранее нами была показана перспективность использования непараметрической (kernel) регрессии в экологических исследованиях, связанных как с определением трофности почвы с помощью электрофизических методов [11], так и при работе с экологическими шкалами [12]. В последнем случае использовался ее одномерный вариант.

Целью настоящей работы явилась апробация объединенных Европейских экологических шкал Н. Ellenberg при использовании для оценки экологического пространства фитоценозов с применением 2D-непараметрической (kernel) регрессии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика была отработана с использованием геоботанических описаний и данных синоптических таблиц по классификации растительности, представленных на сайте «Ценофонд лесов Европейской России» [13], опубликованных в монографиях [14, 15] и статьях периодической печати (В. И. Василевич) [16], а также использованных в работе [17].

Поскольку ЕТИV шкалы содержат значения экологических факторов примерно для 9 000 видов сосудистых растений, ручной поиск видов по таблице Excel является весьма времязатратным и утомительным, поэтому для оптимизации работы со шкалами нами был разработан поиско-

вик на основе Matlab по латинскому названию вида с возможностью пополнения базы синонимами названий растений. С этой целью экологические шкалы в формате таблиц Excel были трансформированы в файл данных Matlab, в нашем случае EuroEllenberg2023.mat. В программу поисковика вводили название или вектор (колонка) латинских названий видов из геоботанических описаний, синоптических таблиц или таблиц из статей или монографий произвольного размера. Итогом работы программы является таблица (таблица 1), которая включает оптимумы (mean, median) и диапазон толерантности (экологическую нишу) (min, max) экологических факторов, сохраняемая в переменных Matlab и, дополнительно, в файле Excel.

Таблица 1. – Фрагмент итоговой таблицы индексов экологических факторов шкал Н. Ellenberg после работы поисковика

sp	code	Light (mean)	Light (median)	Light (min)	Light (max)	Temperature (mean)	Temperature (median)	Temperature (min)	Temperature (max)	Moisture (mean)	Moisture (median)	Moisture (min)	Moisture (max)	Reaction (mean)	Reaction (median)	Reaction (min)	Reaction (max)	Nutrients (mean)	Nutrients (median)	Nutrients (min)	Nutrients (max)	Salinity (mean)	Salinity (median)	Salinity (min)	Salinity (max)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
<i>Alnus glutinosa</i>	1	5,7	5	5	8	5,6	5	5	8	9,2	9	8	12	5,9	6	5	6	6,3	6,5	5	8	0,6	1		1	
<i>Betula pendula</i>	1	7,2	7	7	8	5	5	4	6			3	6,5	3,8	4	3	4	3,4	3	3	4	0,1			1	
<i>Betula pubescens</i>	1	7,3	7	7	9	4,2	4,5	3	6			5	9	3	3	1	4	2,9	3	1	4					
<i>Carex nigra</i>	1			4	9			2	8			3	11			2	6	2,1	2	1	5	0,6	0,8		1	
<i>Dryopteris carthusiana aggr.</i>	1			3	9			3	9			4	12	3,6	3,8	1	5			1	7					
<i>Eriophorum vaginatum</i>	1	7,6	7	7	9	3,6	3,3	2	5	9	9	7,8	11	1,9	2	1	2	1	1	1	1					
<i>Frangula alnus</i>	1	6,3	6	5,5	9	0	0	4,5	8	7,6	7,8	7	8	4,4	4,5	3	5	3,5	3,5	1	5					
<i>Juniperus communis</i>	1	8,1	8	7	9	3,8	4	2	6			3	6,8			3	7	2,6	2,8	1	4					
<i>Molinia caerulea aggr.</i>	1	6,9	7	5	9	5,5	5,3	4,8	6			5	10			3	8	2,1	2	1	3	0,1			1	
<i>Picea abies</i>	1	5,6	5	5	7	3,4	3	3	4	5,8	6	5	6,5	3,8	4	3	4	4,2	4	4	5					
<i>Pteridium aquilinum</i>	1	6,4	6	6	9			5	10	5,2	5	4	6	3,4	3	3	6	3	3	1	5					
<i>Quercus robur</i>	1	6,9	7	6	9			5	9	5,7	6	5	6,5	5	5	3	6			2	6					

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
<i>Salix cinerea</i>	1	7	7	5	9	5,5	5,5	4	7			6	10	5,3	5	5	6	4,4	4,3	4	5	0,1			1
<i>Vaccinium myrtillus</i>	1	5,7	5	5	9			3	7			4	8	1,9	2	1	2	2,5	3	1	3				
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	1	5,1	5	4,5	6	3,2	3	1	4	4,8	5	4	6,3	2	2	2	2	1,9	2	1	3				
<i>Andromeda polifolia</i>	2	8,6	9	7,5	9	4	4	3	5	8,8	9	8	9	1,6	1	1	4	1	1	1	1				
<i>Betula pubescens</i>	2	7,3	7	7	9	4,2	4,5	3	6			5	9	3	3	1	4	2,9	3	1	4				
<i>Carex nigra</i>	2			4	9			2	8			3	11			2	6	2,1	2	1	5	0,6	0,8	1	
<i>Dryopteris carthusiana aggr.</i>	2			3	9			3	9			4	12	3,6	3,8	1	5			1	7				
<i>Eriophorum vaginatum</i>	2	7,6	7	7	9	3,6	3,3	2	5	9	9	7,8	11	1,9	2	1	2	1	1	1	1				

Далее полученный файл данных использовали для расчета и визуализации с помощью 2D-непараметрической (kernel) регрессии. Расчет производили в разработанной нами программе, основанной на использовании kdebiv пакета из Flexible Statistics Data Analysis Toolbox (FSDA) [https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72999-fsda].

В основе вычислений лежит произведение двух произвольных векто-

ров плотности вероятности 1D-непараметрической (kernel) регрессии для оптимумов видов конкретных пар экологических факторов.

Работа программы выглядит следующим образом. При ее запуске появляется меню для выбора фитоценозов, которое позволяет производить единичный или множественный выбор. Затем появляется меню для выбора пары экологических факторов (рисунок 1).

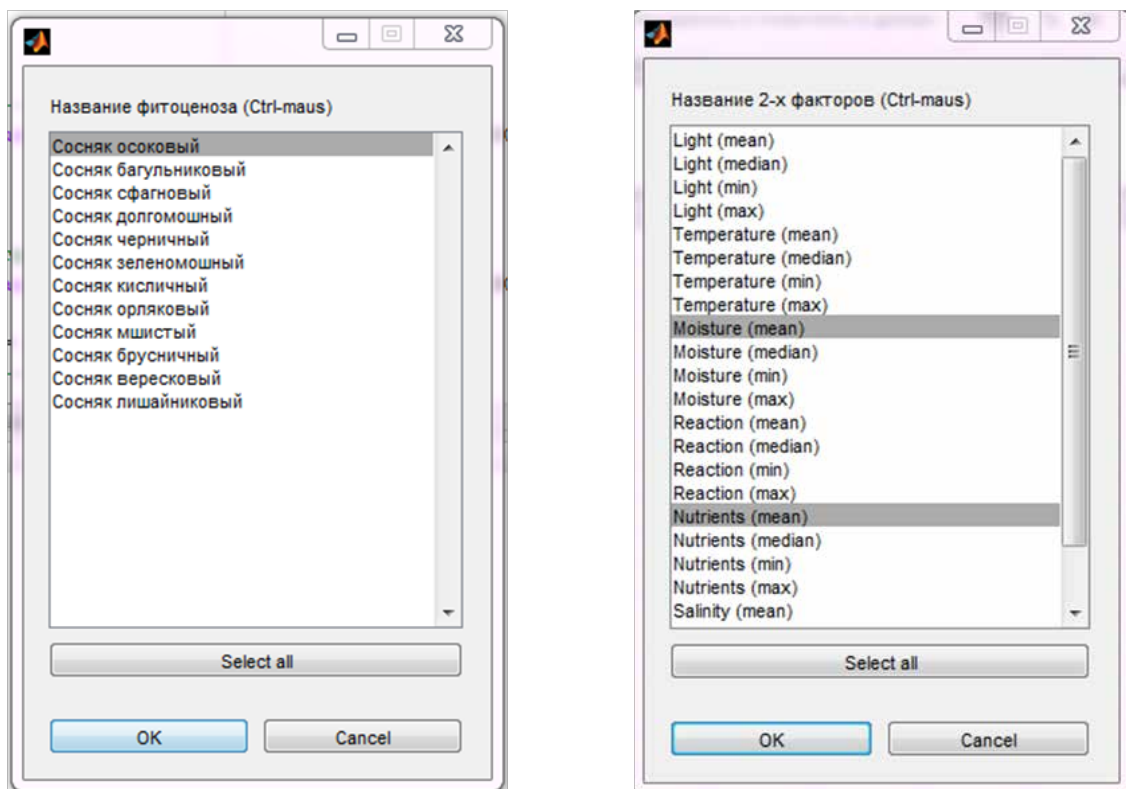


Рисунок 1. – Меню выбора фитоценоза и пар экологических факторов

Следующая пара меню (рисунок 2) позволяет выбрать для обработки все виды фитоценоза (all) или избирательно конкретную совокупность видов (допускается множественный выбор), а также особо интересующий нас вид (доминантный или какой-либо другой).

По завершении работы программы получается плоское цветное изображение трехмерной структуры плотности вероятности (рисунок 3). Допускается возможность получения объемного изображения с помощью инструментов surf и mesh Matlab.

В названии изображения (рисунок 3) приводится полное или сокращенное название фитоценоза. X и Y являются координатами максимума плотности вероятности для сообщества (обозначен желтой звездочкой) (рисунки 3, 4, 6). Координаты видов фитоценоза отображены звездочками малинового (magenta) цвета. Черный треугольник («с усами») позиционирует локализацию доминанта (или любого другого интересующего вида). Его название и координаты дублируются в верхней части

изображения. Размер «усов» пропорционален диапазону толерантности или широте ниши вида по факторам, в нашем случае Moisture (увлажнение) и Nutrients (трофность). Уровни плотности вероятности 0,5 и 0,7 отмечены контурами черного цвета (допускается произвольный выбор числа контуров и порога плотности вероятности). При наличии двух и более максимумов плотности вероятности они отмечаются стрелками с буквенным обозначением (А, Б и др.).

В программе также предусмотрен расчет Евклидова (по умолчанию) или любого другого (по выбору) примерно из 50 видов расстояний между координатами вида и координатами оптимума сообщества – f_dis из пакета Fathom Toolbox for Matlab [http://www.marine.usf.edu/user/djones/matlab/matlab.html]. Координаты сообщества рассчитываются как среднее арифметическое вектора оптимумов видов растений по конкретному фактору. Возможен также расчет как методом взвешенного среднего, так и методом идеального индикатора [18].

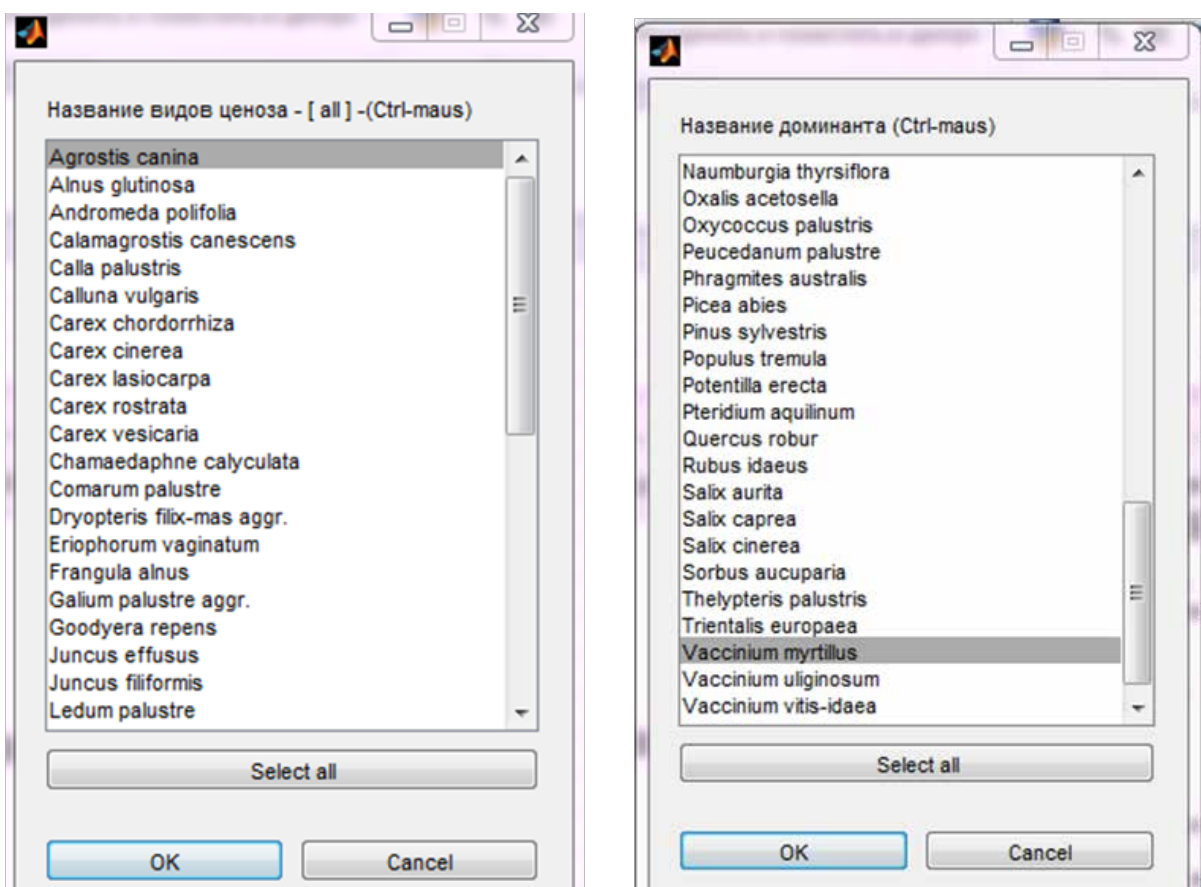


Рисунок 2. – Меню выбора видов фитоценоза и доминанта

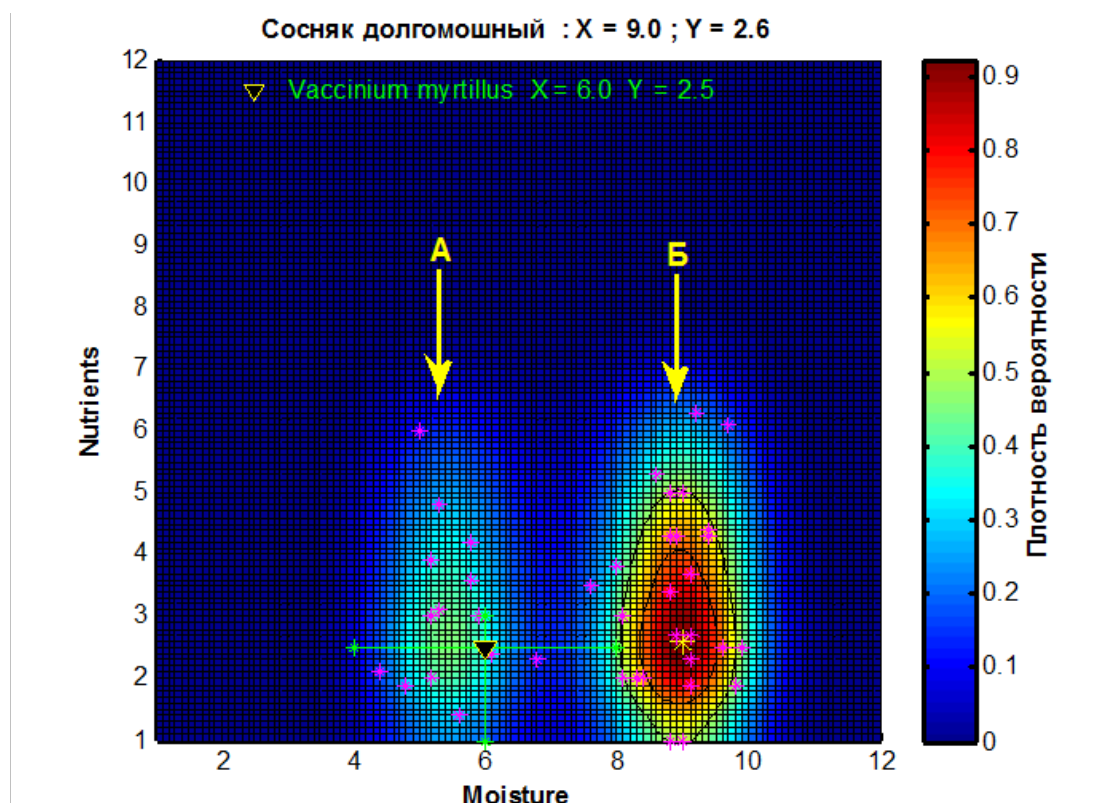


Рисунок 3. – Плотность вероятности для Moisture – Nutrients сосняка долгомошного с доминантом черники (*Vaccinium myrtillus*)

Кроме того, производится определение перечня видов и их координат в пространстве пар факторов (инструмент *inpolygon*), ограниченных контурами уровней плотности вероятности 0,5 или 0,7 (или других по выбору) для последующей характеристики «ядра» оптимумов видов растений сообщества, наиболее близких к оптимуму сообщества.

В программе также предусмотрена количественная оценка доминирования видов сообщества, основанная на расчете геометрического среднего проективного покрытия и встречаемости (формула 1, см. ниже) – требует дополнительного введения вектора, характеризующего обилие вида, например, проективного покрытия, биомассы и пр.

Все результаты выполненных расчетов сохраняются в соответствующих переменных в среде Matlab и одновременно дублируются выводом в табличной форме в файл Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для иллюстрации возможностей разработанной программы и предложенного способа обработки данных экологических

шкал приводим данные для сосняков долгомошных.

Как видно из данных, представленных на рисунке 3, экологическое пространство сосняка долгомошного в координатах Moisture – Nutrients представлено двумя группами видов, с центрами плотности вероятности при $X = 9,0$; $Y = 2,6$ (основной) и $X = 5,4$; $Y = 2,6$ (второстепенный). Данный факт хорошо согласуется и объясняется наличием в сосняке долгомошном выраженного нанорельефа в форме различного рода неровностей поверхности почвы (кочек, приствольных возвышений и проч.), которые формируют градиент увлажнения за счет перепадов высот [19–21].

Как видно из представленных в таблице 2 данных, из лекарственных растений наименьшее значение dE наблюдается для вахты трехлистной (*Menyanthes trifoliata*). Отсюда можно заключить, что условия по увлажнению и трофности в сосняке долгомошном являются оптимальными для вахты трехлистной, хотя она, в отличие от черники, не является доминирующим видом.

Экологическое пространство сосняка долгомошного в координатах Light – Reaction (рисунок 4) представлено одной группой видов с центром плотности вероятности при $X = 7,1$; $Y = 4,3$.

Таблица 2. – Евклидовы расстояния и координаты видов растений сосняка долгомошного основного центра плотности вероятности ($X = 9,0$; $Y = 2,6$) в координатах Moisture – Nutrients

Species	dE	M	N	Species	dE	M	N
<i>Carex chordorrhiza</i>	0,14	8,9	2,7	<i>Carex vesicaria</i>	1,84	9,4	4,4
<i>Carex lasiocarpa</i>	0,14	9,1	2,7	<i>Potentilla erecta</i>	2,22	6,8	2,3
<i>Viola palustris</i>	0,32	9,1	2,3	<i>Calamagrostis canescens</i>	2,40	9	5
<i>Menyanthes trifoliata</i>	0,61	9,6	2,5	<i>Thelypteris palustris</i>	2,41	8,8	5
<i>Carex cinerea</i>	0,71	9,1	1,9	<i>Lysimachia vulgaris</i>	2,73	8,6	5,3
<i>Juncus filiformis</i>	0,82	8,8	3,4	<i>Lythrum salicaria</i>	2,73	8,6	5,3
<i>Agrostis canina</i>	0,85	8,4	2	<i>Trientalis europaea</i>	2,91	6,1	2,4
<i>Carex rostrata</i>	0,91	9,9	2,5	<i>Vaccinium myrtillus</i>	3,00	6	2,5
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	0,92	8,3	2	<i>Lycopodium annotinum</i>	3,13	5,9	3
<i>Salix aurita</i>	0,98	8,1	3	<i>Sorbus aucuparia</i>	3,35	5,8	3,6
<i>Comarum palustre</i>	1,06	9,8	1,9	<i>Phragmites australis</i>	3,57	9,7	6,1
<i>Ledum palustre</i>	1,08	8,1	2	<i>Picea abies</i>	3,58	5,8	4,2
<i>Naumburgia thyrsoflora</i>	1,10	9,1	3,7	<i>Calluna vulgaris</i>	3,61	5,6	1,4
<i>Juncus effusus</i>	1,56	8	3,8	<i>Alnus glutinosa</i>	3,71	9,2	6,3
<i>Eriophorum vaginatum</i>	1,60	9	1	<i>Maianthemum bifolium</i>	3,73	5,3	3,1
<i>Oxycoccus palustris</i>	1,60	9	1	<i>Pteridium aquilinum</i>	3,82	5,2	3
<i>Andromeda polifolia</i>	1,61	8,8	1	<i>Pinus sylvestris</i>	3,85	5,2	2
<i>Frangula alnus</i>	1,66	7,6	3,5	<i>Luzula pilosa</i>	4,02	5,2	3,9
<i>Galium palustre aggr.</i>	1,70	8,9	4,3	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	4,26	4,8	1,9
<i>Peucedanum palustre</i>	1,71	8,8	4,3	<i>Populus tremula</i>	4,30	5,3	4,8
<i>Calla palustris</i>	1,75	9,4	4,3	<i>Goodyera repens</i>	4,63	4,4	2,1

Примечание: dE – Евклидова дистанция, M – Moisture, N – Nutrients.

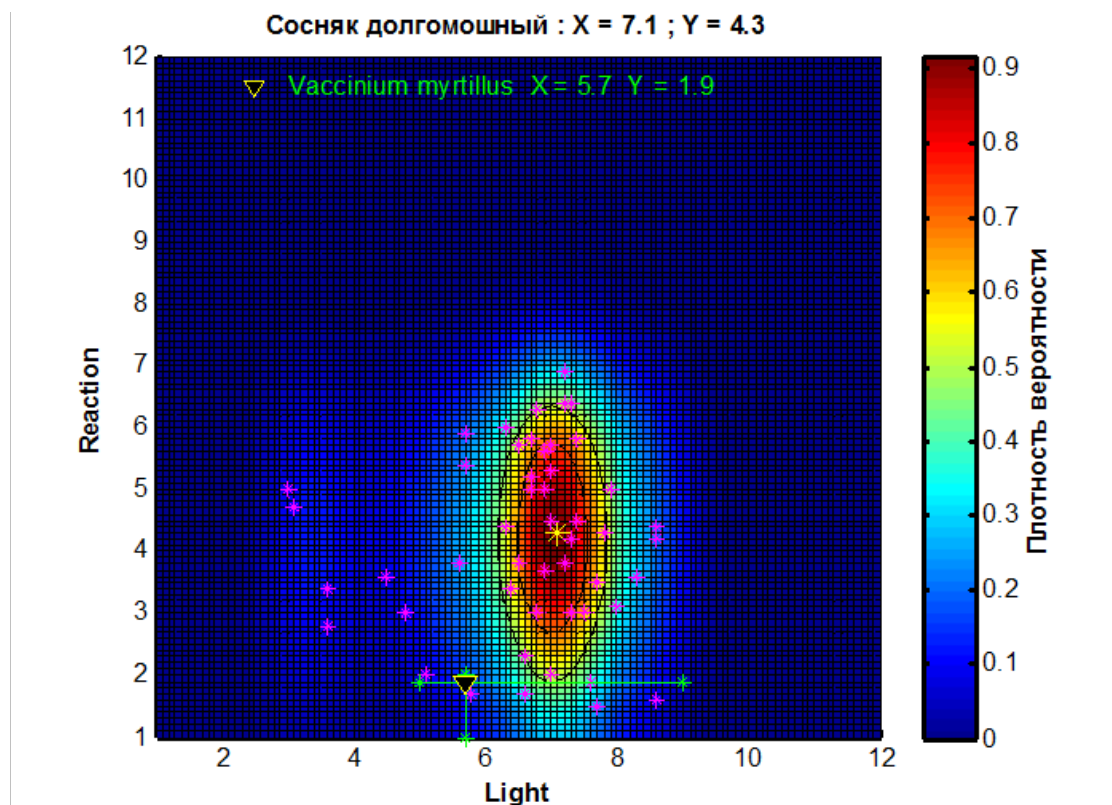


Рисунок 4. – Плотность вероятности для Light–Reaction сосняка долгомошного с доминантом *Vaccinium myrtillus*

Как видно из представленных в таблице 3 данных, из лекарственных растений наименьшее значение dE, как и в предыдущем случае, наблюдается для вахты трехлистной (*Menyanthes trifoliata*). Таким об-

разом, не только по увлажнению и трофности, но и по световому режиму и кислотности почвы экологические условия сосняка долгомошного для вахты трехлистной близки к оптимальным.

Таблица 3. – Евклидовы расстояния и координаты видов растений сосняка долгомошного с центром плотности вероятности (X = 7,1; Y = 4,3) в координатах Light–Reaction

Species	dE	L	R	Species	dE	L	R
<i>Juncus filiformis</i>	0,22	7,3	4,2	<i>Carex vesicaria</i>	1,53	7,4	5,8
<i>Naumburgia thyrsoiflora</i>	0,22	7	4,5	<i>Rubus idaeus</i>	1,55	6,7	5,8
<i>Juncus effusus</i>	0,36	7,4	4,5	<i>Picea abies</i>	1,58	5,6	3,8
<i>Betula pendula</i>	0,51	7,2	3,8	<i>Thelypteris palustris</i>	1,78	5,7	5,4
<i>Pinus sylvestris</i>	0,51	7,2	3,8	<i>Calla palustris</i>	1,88	6,3	6
<i>Salix aurita</i>	0,63	6,9	3,7	<i>Lysimachia vulgaris</i>	2,02	6,8	6,3
<i>Menyanthes trifoliata</i>	0,70	7,8	4,3	<i>Viola palustris</i>	2,06	6,6	2,3
<i>Quercus robur</i>	0,73	6,9	5	<i>Salix caprea</i>	2,10	7,2	6,4
<i>Potentilla erecta</i>	0,78	6,5	3,8	<i>Lythrum salicaria</i>	2,11	7,3	6,4
<i>Populus tremula</i>	0,81	6,7	5	<i>Alnus glutinosa</i>	2,13	5,7	5,9
<i>Frangula alnus</i>	0,81	6,3	4,4	<i>Oxycoccus palustris</i>	2,30	7	2
<i>Galium palustre aggr.</i>	0,98	6,7	5,2	<i>Eriophorum vaginatum</i>	2,45	7,6	1,9
<i>Comarum palustre</i>	1,00	7,7	3,5	<i>Phragmites australis</i>	2,60	7,2	6,9
<i>Salix cinerea</i>	1,00	7	5,3	<i>Trientalis europaea</i>	2,64	4,8	3
<i>Equisetum fluviatile</i>	1,06	7,9	5	<i>Vaccinium uliginosum</i>	2,65	6,6	1,7
<i>Pteridium aquilinum</i>	1,14	6,4	3,4	<i>Goodyera repens</i>	2,69	4,5	3,6
<i>Peucedanum palustre</i>	1,32	6,9	5,6	<i>Vaccinium myrtillus</i>	2,78	5,7	1,9
<i>Betula pubescens</i>	1,32	7,3	3	<i>Vaccinium myrtillus</i>	2,78	5,7	1,9
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	1,33	6,8	3	<i>Calluna vulgaris</i>	2,86	7,7	1,5
<i>Carex cinerea</i>	1,36	7,5	3	<i>Ledum palustre</i>	2,91	5,8	1,7
<i>Carex rostrata</i>	1,39	8,3	3,6	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	3,05	5,1	2
<i>Epilobium tetragonum</i>	1,40	7	5,7	<i>Andromeda polifolia</i>	3,09	8,6	1,6
<i>Agrostis canina</i>	1,50	8	3,1	<i>Maianthemum bifolium</i>	3,61	3,6	3,4
<i>Carex lasiocarpa</i>	1,50	8,6	4,4	<i>Lycopodium annotinum</i>	3,81	3,6	2,8
<i>Carex chordorrhiza</i>	1,50	8,6	4,2	<i>Luzula pilosa</i>	4,02	3,1	4,7
<i>Calamagrostis canescens</i>	1,52	6,5	5,7	<i>Dryopteris filix-mas aggr.</i>	4,16	3	5

Примечание: dE – Евклидова дистанция, L – Light, R – Reaction.

Определение состава видов, которые попадают в объединенный контур с 0,5 уровнем плотности вероятности одновременно для всех четырех исследованных факторов (Moisture – Nutrients и Light – Reaction) выявило весьма ограниченное их количество: *Calamagrostis canescens*, *Carex cinerea*, *Carex vesicaria*, *Juncus filiformis*, *Menyanthes trifoliata*, *Naumburgia thyrsoiflora*, *Oxycoccus palustris*, *Peucedanum palustre*, *Salix aurita* и *Viola palustris*. Они образуют своеобразное «ядро» оптимумов. Оптимумы этих видов в наи-

большей степени совпадают с оптимумом экологического пространства, рассчитанным для сообщества в целом. Но, как и в предыдущих случаях, в этот перечень попадает вахта трехлистная, для которой условия сосняка долгомошного, как следует из полученных данных, являются оптимальными.

Заметим также, что анализ Евклидовых (или других по выбору) расстояний относительно оптимума сообщества может послужить основанием для введения нового показателя, характеризующего

растительное сообщество, аналогичного функциональной дисперсии (FD_{is}) [22].

Вместе с тем в ходе работы с экологическими шкалами выявились и некоторые проблемы, решить которые в полной мере не удалось.

Во-первых, не для всех видов в объединенных Европейских экологических шкалах Н. Ellenderg имеется полный набор значений (mean, median, min и max) по всем факторам.

Для ряда видов в шкалах имеются значения min и max, но отсутствуют значения mean и median. В некоторой степени их отсутствие удастся компенсировать расчетом mean из значений min и max ($\text{mean} = (\text{min} + \text{max})/2$). В программе предусмотрен такой вариант «оптимизации» значений шкал. Однако его недостатком является своеобразный «сглаживающий» эффект.

Во-вторых, отсутствие данных даже для одного вида в паре факторов приводит к его исключению из расчетов. Это не является особо критичным при работе с многовидовыми сообществами или синоптическими таблицами классификации растительности, но является весьма существенным при работе с бедными видами сообществами, каковыми являются, например, сосняки багульниковые и сфагновые. Это усугубляется отсутствием в объединенных экологических шкалах оптимумов и диапазона толерантности для мхов и лишайников.

Как показывают проведенные исследования [23], для определения экологического пространства растительных сообществ с максимальной точностью достаточно наличие в геоботаническом описании около 20–25 видов (при наличии 6–12 видов достигается 80% точность), что не всегда соблюдается в упомянутых выше растительных сообществах болот.

В-третьих, имеет место сложность в определении доминантов растительного сообщества при работе с набором конкретных геоботанических описаний. На одних учетных площадках вид может даже отсутствовать, и в то же время на других – его проективное покрытие может достигать 50% и более, что указывает на его явное доминирование. Однако поскольку полученные результаты на основании математико-статистического анализа набора геоботанических описаний экстраполируются на исследуемое растительное сообщество

в целом, например, сосняк долгомошный, то необходима соответствующая методика для корректной количественной оценки степени доминирования и выявления доминанта.

С нашей точки зрения, наиболее подходящим является геометрическое среднее из произведения проективного покрытия (или биомассы) – P и встречаемости – F [24]:

$$W = \sqrt{P * F}, \quad (1)$$

где W – доминирование, %;
P – проективное покрытие, %;
F – встречаемость.

В-четвертых, не всегда оптимум доминирующего по проективному покрытию вида совпадает с оптимумом сообщества (например, черника и вахта трехлистная), чего следовало ожидать и что не всегда наблюдается в действительности. Практически полное совпадение оптимумов доминирующих видов и сообщества в целом наблюдалось нами для некоторых бедных видами сообществ, таких как сосняки багульниковые, сфагновые, лишайниковые и даже брусничные. Данный факт заслуживает дальнейшего исследования.

В-пятых, в пределах растительного сообщества могут существовать группы растений (локусы) на отдельных компонентах нанорельефа (кочки, западины). В связи с этим, расчет экологического пространства для сообщества как методами невзвешенного и взвешенного среднего, так и методом идеального индикатора будет давать смещенную оценку, лежащую между двумя или более максимумами плотности вероятности (рисунок 5).

Обособленные группы видов растений, кроме рассмотренного выше сосняка долгомошного, наблюдались нами также для фитоценозов верхового (сосняк сфагновый и багульниковый) и низинного (сосняк осоковый) болот. Такие группы имеют достаточно гибкий состав, их локализация в экологическом пространстве и выраженность максимумов плотности вероятности может варьировать в зависимости, например, от географического происхождения сообщества (рисунок 6).

Все сказанное выше дает основание заключить, что использование 2D-непараметрической (kernel) регрессии при оценке

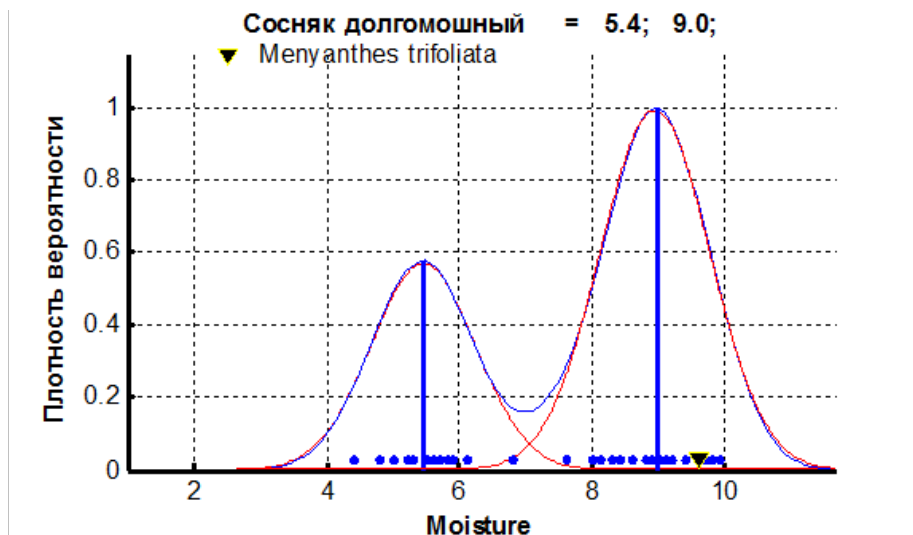


Рисунок 5. – Плотность вероятности для Moisture сосняка долгомошного

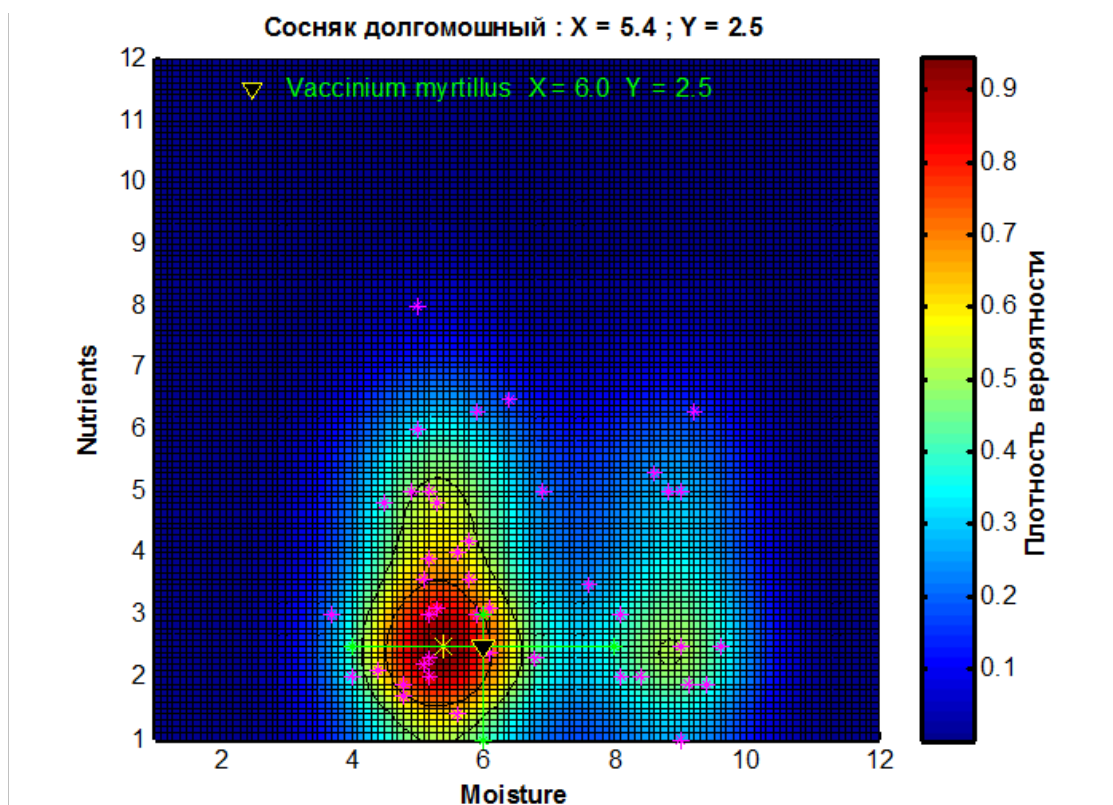


Рисунок 6. – Плотность вероятности для Moisture – Nutrients сосняка долгомошного с доминантом черникой (*Vaccinium myrtillus*)

экологического пространства сообществ с помощью экологических шкал открывает дополнительные возможности в познании экологии растительных сообществ и составляющих их видов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследова-

ний разработана программа в среде Matlab для оценки экологического пространства растительных сообществ с помощью 2D-непараметрической (kernel) регрессии. На примере анализа экологического пространства сосняка долгомошного с применением объединенных Европейских экологических шкал Н. Ellenberg выявлено наличие в некоторых сообществах группи-

ровок растений, обусловленных компонентами нанорельефа. Отмечены проблемные вопросы использования экологических шкал для оценки экологического пространства растительных сообществ и необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

SUMMARY

G. N. Buzuk
2D NONPARAMETRIC (KERNEL)
REGRESSION IN THE ANALYSIS
OF PHYTOCOENOSES USING
H. ELLENBERG ECOLOGICAL SCALES

As a result of the research a program was developed in the Matlab environment to assess ecological environment of phytocoenoses using 2D-nonparametric (kernel) regression. Presence of local groups in some communities due to the nanorelief components was revealed on the example of ecological environment analysis of long-moss pinery using combined European H. Ellenberg ecological scales. Localization and intensity of probability density maxima can vary depending, for example, on the geographic origin of the environment. Problematic issues of environmental scales application to assess ecological environment of phytocoenoses and the need for further research in this direction are noted. This is primarily due to environmental scales imperfection. In general, the use of 2D nonparametric (kernel) regression in assessing ecological environment of phytocoenoses using environmental scales provides new opportunities in understanding plant communities ecology and their constituent species.

Keywords: H. Ellenberg ecological scales, nonparametric (kernel) regression, ecological environment of phytocoenoses.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пространственное варьирование показателей экологического состояния дерново-лесных почв Усманского бора / А. В. Белик [и др.] // Лесотехнич. журн. – 2020. – Т. 10, № 3. – С. 5–15.
2. Литвинович, А. В. Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв / А. В. Литвинович // Агрохимия. – 2007. – № 5. – С. 89–94.
3. Медведев, В. В. Неоднородность агрохимических показателей почвы в пространстве и во времени / В. В. Медведев, А. И. Мельник //

Агрохимия. – 2010. – № 1. – С. 20–26.

4. Рыжова, И. М. Пространственная вариативность запасов органического углерода в почвах лесных и степных биогеоценозов / И. М. Рыжова, М. А. Подвезенная // Почвоведение. – 2008. – № 12. – С. 1429–1437.

5. Карпачевский, Л. О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе / Л. О. Карпачевский. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1977. – 312 с.

6. Карпачевский, Л. О. Динамика свойств почвы / Л. О. Карпачевский. – Москва: ГЕОС, 1997. – 170 с.

7. Березин, Л. В. Лесное почвоведение / Л. В. Березин, Л. О. Карпачевский. – Омск: Омский гос. аграрный ун-т, 2009. – 360 с.

8. Почвенно-биогеоценозические исследования в лесных биогеоценозах / Л. О. Карпачевский [и др.]. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1980. – 160 с.

9. Зверев, А. А. Методические аспекты применения фитоиндикационного анализа в изучении биоразнообразия / А. А. Зверев // Сибирский эколог. журн. – 2020. – Т. 27, № 4. – С. 401–415.

10. Ellenberg type indicator values for European vascular plant species / L. Tichý [et al.] // J. of vegetation science. – 2023. – Vol. 34, N 1. – P. e13168.

11. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 5. Полевые испытания / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. – 2022. – № 2. – С. 65–76.

12. Бузук, Г. Н. Определение экологического пространства растительных сообществ методом идеального индикатора с помощью объединенных Европейских шкал Н. Ellenberg / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. – 2023. – № 2. – С. 72–81.

13. Ханина, Л. Г. Характеристика экологических шкал [Электронный ресурс] / Л. Г. Ханина // Ценофонд лесов Европейской России. – Режим доступа: <http://mfd.cepl.rssi.ru/flora/ecoscale.htm>.

14. Ловчий, Н. Ф. Кадастр типов сосновых лесов Белорусского Поозерья: монография / Н. Ф. Ловчий, А. В. Пучило, В. Д. Гуцевич. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 194 с.

15. Ловчий, Н. Ф. Кадастр типов сосновых лесов Белорусского Полесья / Н. Ф. Ловчий; науч. ред. В. И. Парфенов; Науч.-практ. центр НАН Беларуси по биоресурсам, Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперимент. ботаники им. В. Ф. Купревича. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 221 с.

16. Василевич, В. И. Сероольшаники Европейской России / В. И. Василевич // Ботанический журн. – Т. 83, № 8. – С. 28–42.

17. Бузук, Г. Н. Лимитирующие факторы для фитоценозов: технология оценки (на примере сосновых лесов центральной Беларуси) /

Г. Н. Бузук, О. В. Созинов, Р. В. Цвирко // Социально-экологические технологии. – 2017. – № 1. – С. 27–40.

18. Бузук, Г. Н. Комплексный способ расчета режимов экологических факторов среды (экологического пространства) растительных сообществ для амплитудных экологических шкал / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. – 2021. – № 2. – С. 48–58.

19. Бойко, В. И. Характеристика формаций сосновых и еловых лесов республиканского заказника "Средняя Припять" / В. И. Бойко, Е. В. Бойко // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 23–25 апр. 2014 г. : в 4 ч. / под ред. А. А. Волчека [и др.]. – Брест: Брестск. гос. техн. ун-т, 2014. – Ч. 1. – С. 25–29.

20. Демаков, Ю. П. Лесорастительные условия верховых болот Марийского Полесья / Ю. П. Демаков, М. Г. Сафин, Г. А. Богданов // Вестн. Поволжского гос. технологич. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2010. – № 3. – С. 27–37.

21. Демаков, Ю. П. Сосняки сфагновые Марийского Полесья: структура, рост и продуктивность: монография / Ю. П. Демаков, М. Г. Сафин, С. М. Швецов. – Йошкар-Ола: Марийский гос. технич. ун-т, 2012. – 276 с.

22. Laliberté, E. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits / E. Laliberté, P. Legendre // Ecology. – 2010. – Vol. 91, N 1. – P. 299–305.

23. Pinto, P. E. Optimizing the bioindication of forest soil acidity, nitrogen and mineral nutrition using plant species / P. E. Pinto [et al.] // Ecological Indicators. – 2016. – Vol. 71. – P. 359–367.

24. Баканов, А. И. Количественная оценка доминирования в экологических сообществах / А. И. Баканов // Количественные методы экологии и гидробиологии (сборник научных трудов, посвященный памяти А. И. Баканова) / отв. ред. Г. С. Розенберг. – Тольятти: Самарский науч. центр, 2005. – С. 37–67.

REFERENCES

1. Belik AV, Gorbunova IuS, Deviatova TA, Alaeva LA. Spatial variation of indicators of the ecological state of sod-forest soils of the Usman pine forest. *Lesotekhnich zhurn.* 2020;10(3):5–15. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/1. (In Russ.)

2. Litvinovich AV. Spatial heterogeneity of agrochemical parameters of arable soddy-podzolic soils. *Agrokhimia.* 2007;(5):89–94. (In Russ.)

3. Medvedev VV, Mel'nik AI. Heterogeneity of soil agrochemical indicators in space and time. *Agrokhimia.* 2010;(1):20–6. (In Russ.)

4. Ryzhova IM, Podvezennaia MA. Spatial variability of organic carbon reserves in soils of

forest and steppe biogeocenoses. *Pochvovedenie.* 2008;(12):1429–37. (In Russ.)

5. Karpachevskii LO. Diversity of soil cover in forest biogeocenosis. Moskva, RF: Izd-vo Mosk un-ta; 1977. 312 s. (In Russ.)

6. Karpachevskii LO. Dinamika svoistv pochvy. Moskva, RF: GEOS; 1997. 170 s. (In Russ.)

7. Berezin LV, Karpachevskii LO. Forest soil science. Omsk, RF: Omskii gos agrarnyi un-t; 2009. 360 s. (In Russ.)

8. Karpachevskii LO, Voronin AD, Dmitriev EA, Stroganova MN, Shoba SA. Soil biogeocenotic studies in forest biogeocenoses. Moskva, RF: Izd-vo Mosk un-ta; 1980. 160 s. (In Russ.)

9. Zverev AA. Methodological aspects of the application of phytoindication analysis in the study of biodiversity. *Sibirskii ekolog zhurn.* 2020;27(4):401–15. doi: 10.15372/SEJ20200401. (In Russ.)

10. Tichý L, Axmanova I, Dengler J, Guarino R, Jansen F, Midolo G et al. Ellenberg type indicator values for European vascular plant species. *J Veg Sci.* 2023;34(1):e13168. doi: 10.1111/jvs.13168

11. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. *Message 5. Field trials. Vestn farmatsii.* 2022;(2):65–76. doi: 10.52540/2074-9457.2022.2.65. (In Russ.)

12. Buzuk GN. Determination of the ecological space of plant communities by the ideal indicator method using the combined European scales H. Ellenberg. *Vestn farmatsii.* 2023;(2):72–81. doi: 10.52540/2074-9457.2023.2.72. (In Russ.)

13. Khanina LG. Characteristics of environmental scales [Elektronnyi resurs]. Tsenofond lesov Evropeiskoi Rossii. Rezhim dostupa: <http://mfd.cepl.rssi.ru/flora/ecoscale.htm>. (In Russ.)

14. Lovchii NF, Puchilo AV, Gutsevich VD. Inventory of pine forest types in the Belarusian Lake District. Minsk, RB: Belarus navuka; 2009. 194 s. (In Russ.)

15. Lovchii NF; Nauchno-prakticheskii tsentr NAN Belarusi po bioresursam, Natsional'naia akademiia nauk Belarusi, Institut eksperimental'noi botaniki im VF Kuprevicha. Cadastre of pine forest types in Belarusian Polissya. Parfenov VI, redactor. Minsk, RB: Belarus navuka. 2012. 221 s. (In Russ.)

16. Vasilevich VI. Gray alder forests of European Russia. *Botanicheskii zhurn.* 1998;83(8):28–42. (In Russ.)

17. Buzuk GN, Sozinov OV, Tsvirko RV. Limiting factors for phytocenoses: assessment technology (on the example of pine forests in central Belarus). *Sotsial'no-ekologicheskie tekhnologii.* 2017;(1):27–40. (In Russ.)

18. Buzuk GN. A complex method for calculating the regimes of ecological factors of the environment (ecological space) of plant com-

munities for amplitude ecological scales. Vestn farmatsii. 2021;(2):48–58. doi: 10.52540/2074-9457.2021.2.48. (In Russ.)

19. Boiko VI, Boiko EV. Characteristics of pine and spruce forest formations in the Republican Nature Reserve "Middle Pripyat". V: Volchek AA, Meshik OP, Basov SV, Valuev VE, Vodchits NN, Zhitenev BN i dr, redaktory. Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sokhraneniia srede obitaniia: sb nauch statei Mezhdunar nauch-prakt konf, Brest, 23–25 apr 2014 g : v 4 ch. Brest, RB: Brestsk gos tekhn un-t; 2014. Ch. 1. s. 25–9. (In Russ.)

20. Demakov IuP, Safin MG, Bogdanov GA. Forest conditions of the raised bogs of Mari Polesie. Vestn Povolzhskogo gos tekhnologich un-ta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. 2010;(3):27–37. (In Russ.)

21. Demakov IuP, Safin MG, Shvetsov SM. Sphagnum pine forests of Mari Polesie: structure, growth and productivity: monografiia. Ioshkar-Ola, RF: Mariiskii gos tekhnich un-t; 2012. 276 s. (In Russ.)

22. Laliberté E, Legendre P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. Ecology. 2010;91(1):299–305. doi: 10.1890/08-2244.1

23. Pinto PE, Dupouey JL, Herve JC, Legay M, Wurpillot S, Montpied P et al. Optimizing the bioindication of forest soil acidity, nitrogen and mineral nutrition using plant species. Ecol Indic. 2016;71:359–67.

24. Bakanov AI. Quantifying dominance in ecological communities. V: Rozenberg GS, redaktor. Kolichestvennye metody ekologii i gidrobiologii (sbornik nauchnykh trudov, posviashchenyi pamiati A. I. Bakanova). Tol'iatti, RF: Samar-skii nauch tsentr; 2005. s. 37–67. (In Russ.)

Адрес для корреспонденции:

г. Витебск, Республика Беларусь,

тел. +375-29-715-08-38,

e-mail: buzukg@mail.ru,

профессор, доктор фармацевтических наук,

Бузук Г.Н.

Поступила 10.08.2023 г.

УДК 615.451.16:615.322

DOI: <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2023.3.30>

А. А. Климович, Н. Ю. Адамцевич, О. С. Игнатовец

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРАКЦИИ
ФЛАВОНОИДОВ ИЗ ЦВЕТОЧНОЙ МАССЫ ПУПАВКИ БЛАГОРОДНОЙ
(*CHAMAEMELUM NOBILE* (L.) ALL.)**

**Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Республика Беларусь**

*Пулавка благородная (*Chamaemelum nobile* (L.) All.) – ценное лекарственное растение, имеющее высокий производственный потенциал. В народной медицине препараты на основе пулавки благородной используются для лечения диспепсии и воспаления ротовой полости, перорально для симптоматического лечения желудочно-кишечных расстройств и в качестве вспомогательного средства при лечении болезненного компонента функциональных пищеварительных симптомов. При местном применении – это смягчающее и снимающее зуд дополнение для лечения кожных заболеваний и трофическое защитное средство от трещин, ссадин, обморожений и укусов насекомых. В цветочной массе пулавки благородной содержатся флавоноиды, в основном в гликозидной форме.*

В данной работе представлены результаты исследования влияния различных параметров процесса экстракции цветочной массы пулавки благородной (концентрация этилового спирта, температура, соотношение массы сырья к объему экстрагента, продолжительность и кратность) на выход флавоноидов. С использованием ортогонального центрального композиционного планирования была получена зависимость, описывающая влияние температуры и продолжительности процесса экстракции на эффективность извлечения целевых компонентов. В результате проведенного исследования установлено, что для достижения выхода флавоноидов более 2,5 %, при экстракции цветочной массы пулавки благородной следует использовать 50%-й этиловый спирт в качестве экстрагента, при этом соотношение массы сырья к объему экстрагента должно составлять 1 : 50, темпе-