

ЭКОЛОГИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ECOLOGY, SOIL SCIENCE AND NATURE MANAGEMENT

DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-4-873

УДК 574.4



Научная статья

ДОПОЛНЕНИЯ К ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ОЦЕНКЕ СРЕДЫ УРБОЭКОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОНОВЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ ЗЕЛЁНЫХ ЗОН

*В.М. Нестеренко, И.В. Москаленко,
М.В. Авраменко, Л.Н. Анищенко*

В статье рассмотрены результаты долговременного биоиндикационного исследования, выполненного в период с 2017 по 2023 гг., по изучению содержания в пробе биомассы фоновых видов зелёных насаждений (интродуцентов и аборигенных видов) аминокислоты – пролина, как основного биохимического маркера состояния среды в условиях сильного сочетания стрессовых факторов. В качестве биоиндикаторов в эксперименте выступили элементы зелёных насаждений административных районов города Брянска: Советского, Бежицкого, Фокинского, Володарского, а также в контроле – д. Добрунь Брянского района: во внимание принималось 14 видов покрытосеменных и голосеменных растений.

***Цель работы** – оценить в долговременном аспекте изменение содержания аминокислоты пролина как биохимического маркера состояния среды крупного города Нечерноземья РФ при диагностике биомассы фоновых растений. Представлен коэффициент устойчивости дендрофлоры, произрастающей в четырёх административных районах г. Брянска, с указанием минимального и максимального значения кумуляции аминокислоты по районам и индексом загрязнения воздуха. Наименьшее значение коэффициента кумуляции рассчитано для видов: *Pinus sylvestris* L. (3,5-3,97), *Picea abies* L. (3,68-4,14), *Picea pungens* L. (3,77-4,28); наибольшее значение – *Aesculus hippocastanum* L. (6,17-*

6,59), *Acer negundo* L. (6,29-6,74), *Syringa vulgaris* L. (6,38-6,8). Составлен ряд чувствительности древесных растений к загрязнению по степени уменьшения содержания пролина: *Pinus sylvestris* < *Picea abies* L. < *Picea pungens* L. < *Thuja occidentalis* L. < *Quercus robur* < *Betula pendula* < *Salix triandra* < *Tilia cordata* < *Sorbus aucuparia* < *Robinia pseudoacacia* < *Acer platanoides* < *Acer negundo* < *Aesculus hippocastanum* < *Syringa vulgaris*.

Установлено, что концентрация пролина связана регрессионной зависимостью с расчётным индексом загрязнения воздуха: с ростом аэротехногенного загрязнения содержание аминокислоты возрастает.

Ключевые слова: пролин; виды интродуценты; аборигенные виды; биодиагностика; биоиндикаторы; зелёные насаждения; урбоэкосистема

Для цитирования. Нестеренко В.М., Москаленко И.В., Авраменко М.В., Анищенко Л.Н. Дополнения к долговременной оценке среды урбоэкосистем с использованием фоновых видов растений зелёных зон // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Т. 16, №4. С. 105-125. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-4-873

Original article

THE ADDITIONS TO LONG-TERM ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF URBOECO-SYSTEMS USING BACKGROUND SPECIES GREEN AREAS PLANTS

*V.M. Nesterenko, I.V. Moskalenko,
M.V. Avramenko, L.N. Anishchenko*

The article discusses the results of a long-term bioindication study carried out in the period from 2017 to 2023 years to study the content of the amino acid proline in a biomass sample of background species of green spaces (introduced and native species), as the main biochemical marker of the state of the environment under conditions of a strong combination of stress factors. The bioindicators in the experiment were elements of green spaces in the administrative districts of the city of Bryansk: Sovetsky, Bezhitsky, Fokinsky, Volodarsky, as well as in the control - the village of Dobrun, Bryansk district: 14 species of angiosperms and gymnosperms were taken into account.

The purpose of the work is to evaluate in the long term the change in the content of the amino acid proline as a biochemical marker of the state of the

environment of a large city in the Non-Black Earth Region of the Russian Federation when diagnosing the biomass of background plants. The stability coefficient of dendroflora growing in 4 districts of Bryansk is presented, indicating the minimum and maximum values of amino acid cumulation by region and the air pollution index. The lowest value of the cumulation coefficient was calculated for the species: *Pinus sylvestris* L. (3,5-3,97), *Picea abies* L. (3,68-4,14), *Picea pungens* L. (3,77-4,28); highest value: *Aesculus hippocastanum* L. (6,17-6,59), *Acer negundo* L. (6,29-6,74), *Syringa vulgaris* L. (6,38-6,8). A series of sensitivity of woody plants to air pollution has been compiled according to the degree of reduction in proline content: *Pinus sylvestris* < *Picea abies* L. < *Picea pungens* L. < *Thuja occidentalis* L. < *Quercus robur* < *Betula pendula* < *Salix triandra* < *Tilia cordata* < *Sorbus aucuparia* < *Robinia pseudoacacia* < *Acer platanoides* < *Acer negundo* < *Aesculus hippocastanum* < *Syringa vulgaris*.

It has been **established** that the concentration of proline is related by a regression relationship to the calculated air pollution index: with the growth of aerotechnogenic pollution, the content of the amino acid increases.

Keywords: proline; introduced species; native species; biodiagnostics; bioindicators; green spaces; urban ecosystem

For citation. V.M. Nesterenko, I.V. Moskalenko, M.V. Avramenko, L.N. Anishchenko The Additions to Long-Term Environmental Assessment of Urboeco-Systems using Background Species Green Areas Plants. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2024, vol. 16, no. 4, pp. 105-125. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-4-873

Введение

Многочисленные эксперименты по направлениям биохимического мониторинга, проведённые за последние 20 лет, выявили перспективные биоиндикаторы: древесные и кустарниковые растения в урбоэкосистемах, в промышленно загрязнённых территориях и на участках эталонных экосистем; мохообразные и лишайники для диагностики качества воздуха даже на трансграничных территориях в соответствии с международной программой ООН [8; 12-14; 20; 21].

Особенно востребованы комплексные исследования для выявления состояния сред обитания в урбоэкосистемах, так как они сосредотачивают самые разнообразные загрязнители, формируя техногенную биогеохимическую провинцию с плохо прогнозируемыми загрязнителями и их концентрацией, превосходящей содержание ионов, например, в месторождениях. В городах на биоиндикаторы оказывает воздействие и

совместные способы поступления поллютантов: через элементы почвенно-поглощающего комплекса, через воздух и даже при самоочищении атмосферы с потоками дождя.

Пролин – низкомолекулярный метаболит, который представляет собой часть антиоксидантной системы растений, общий механизм функционирования которой требует дополнительных изысканий, несмотря на более чем 60-летнюю историю изысканий [16; 17]. Пролин (нейтральная аминокислота, хорошо растворим в воде, видимо синтезируется из орнитина и глутамата у растений, известный осмопротектор), как ключевой детерминант белкового комплекса плазмалеммы, определяющих транспортную, ферментативную функцию клеточного барьера; кроме того, по некоторым данным аминокислота участвует в синтезе запасных белков-протекторов [3; 9; 10]. В последнее десятилетие обоснованы новые роли пролина в ростовых процессах и совокупности этапов развития у биосистем [16; 17; 19]. Таким образом концентрация аминокислоты в растительных тканях – важное условие нормального функционирования системы: пролин регулирует экспрессию гена циклина на уровне транскрипции, хелатирует металлы, ксилогенез, развитие соцветий, увеличение размеров корня и побега, развитие зародыша в семени [15; 17]. По мнению ряда зарубежных авторов «пролиновый взрыв» диагностируется как следствие абиотического стресса и быстрого формирования защитного барьера у сельскохозяйственных и дикорастущих растений, повышая активности других антиоксидантов [9; 10; 16-18]. В связи с вышеизложенным, диагностика индивидуально накопления пролина в условиях сильного сочетанного урбаногенного стресса достаточно актуальна и будет способствовать обновлению базы биоиндикационных исследований в мониторинге, оптимизации диагностики среды и разработки механизмов её улучшения.

Цель работы – оценить в долговременном аспекте изменение содержания аминокислоты пролина как биохимического маркера состояния среды крупного города Нечерноземья РФ при диагностике биомассы фоновых растений.

Материалы, методы и методики исследований

Пролин (Пр) – гетероциклическая аминокислота, содержание которой – показатель абиотического стресса. Накопление пролина – важный защитный механизм, который стабилизирует устойчивость мембран и белковые структуры, уменьшает у растений стресс от обезвоживания, регулирует мембранный потенциал при синтезе АТФ. Если концентрация Пр возрастает – это свидетельствует о результатах воздействия стресса [3; 5]. Определение

пролина проводили по методике Bates с изменениями (1973) с использованием нингидрина. Рассчитывали коэффициент устойчивости (КУ) [11].

Биомассу листовых пластинок исследовали у фоновых видов, имеющих различное происхождение – аборигенов и интродуцентов: 1. *Quercus robur* L. (Qr L.), 2. *Acer platanoides* L. (Ap L.), 3. *Tilia cordata* L. (Tc L.); 4. *Betula pendula* L. (Bp L.), 5. *Aesculus hippocastanum* L. (Ah L.), 6. *Picea abies* L. (Pa L.), 7. *Picea pungens* L. (Pp L.), 8. *Thuja occidentalis* L. (To L.), 9. *Salix triandra* L. (St L.), 10. *Pinus sylvestris* L. (Ps L.), 11. *Acer negundo* L. (An L.), 12. *Sorbus aucuparia* L. (Sa L.), 13. *Syringa vulgaris* L. (Sv L.), 14. *Robinia pseudoacacia* L. (Rp L.) [4]. Все пробы отобраны с соблюдением требований и единых методик пробоотбора [2; 6].

Исследование проходило в административных районах города Брянска на территории зелёных зон. Общая площадь, занятая зелёными насаждениями, составила 1102,2 га в Советском, Бежицком, Фокинском, Володарском районах [7]. Так как конструирование зелёных зон в городе проходило по единому плану, в районах представлен схожий сортимент видов двух отделов. Точки пробоотбора биомассы представлены на рисунке 1-4.

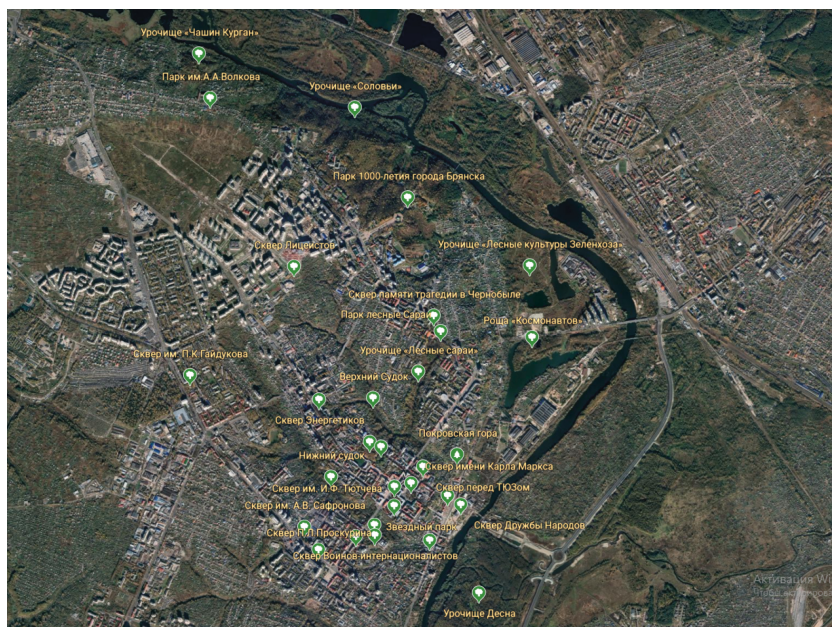


Рис. 1. Зелёные насаждения г. Брянска (Советский р-н)

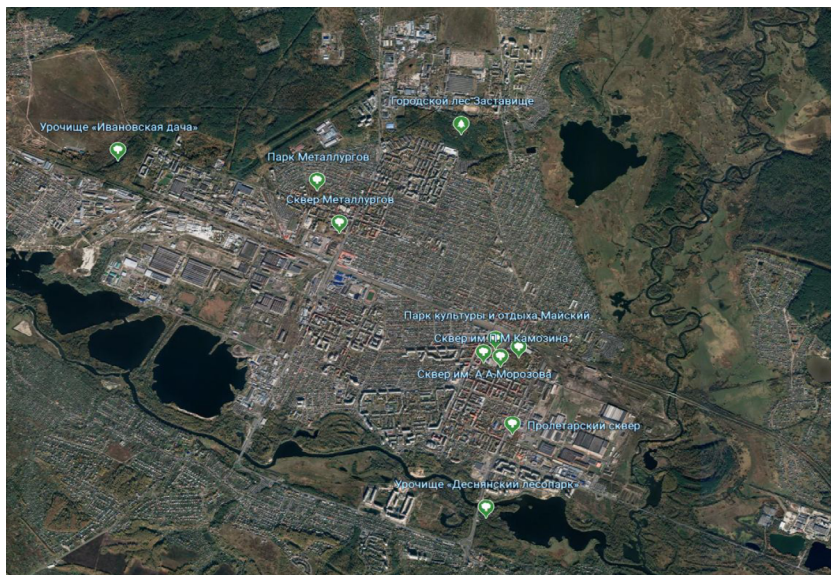


Рис. 2. Зелёные насаждения г. Брянска (Бежицкий р-н)

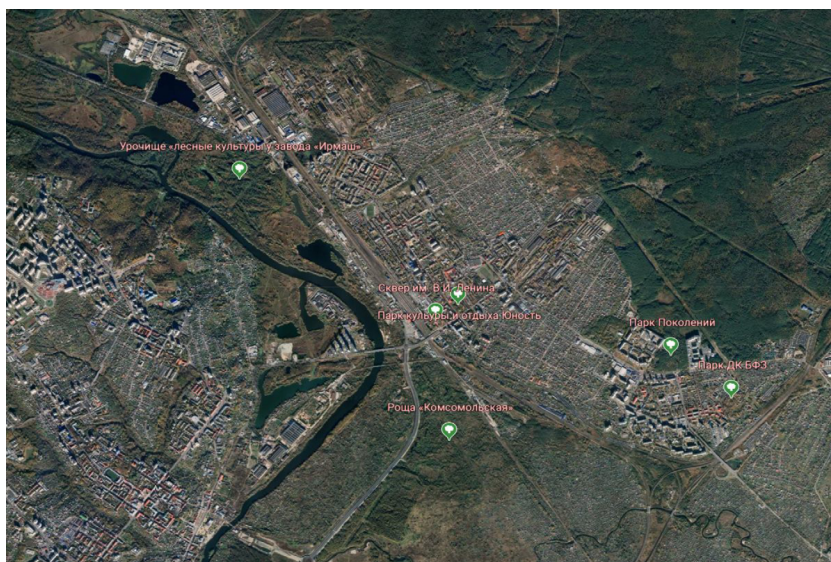


Рис. 3. Зелёные насаждения г. Брянска (Володарский р-н)



Рис. 4. Зелёные насаждения г. Брянска
(Фокинский р-н)

Результаты работы и обсуждение

Для установления возможности использования биохимического критериального оценочного показателя – содержание пролина в биомассе древесных и кустарниковых растений – в общей диагностике среды проведены сравнительные исследования для реперных точек урбоэкосистемы. Ввиду малого изменения концентрации стресс-индуцированного пролина в условиях постоянно действующих факторов урбоэкосистем провели сравнительную характеристику содержания аминокислоты за шестилетний период в 2017 и 2023 г. В таблицах 1 и 2 отражены показатели пролина в биомассе фоновых видов растений при стресс-адаптации. Все экземпляры растений для пробоотбора выбирались в среднем генеративном (g2) онтогенетическом состоянии, поэтому результаты содержания аминокислоты использовали для сравнительных биоиндикационных характеристик.

Таблица 1.

**Показатели содержания аминокислоты пролина в биомассе листьев
фоновых видов растений на территории г. Брянска (2017 г.)**

№ п/п	Виды растений	Содержание (M ±m) пролина, мг% на сырую массу		КУ
		д. Добрунь Брянско-го района, контроль	экспериментальное исследование	
Советский район				
	Ps L.	7,1±0,07	28,18±2,5	3,97
	Pa L.	7,3±0,06	30,22±2,5	4,14
	Pp L.	7,6±0,08	32,53±2,5	4,28
	To L.	7,8±0,05	35,49±3,1	4,55
	Qr L.	8,5±0,07	40,72±2,4	4,79
	Bp L.	8,7±0,05	43,85±2,3	5,04
	St L.	9,1±0,08	48,96±3,1	5,38
	Tc L.	9,8±0,07	55,27±1,2	5,64
	Sa L.	10,2±0,08	60,48±2,3	5,93
	Rp L.	11,3±0,09	70,74±3,0	6,26
	Ap L.	11,8±0,07	76,35±2,9	6,47
	Ah L.	13,1±0,10	86,33±3,0	6,59
	An L.	14,3±0,10	95,38±3,2	6,74
	Sv L.	15,4±0,11	104,72±3,0	6,80
Бежицкий район				
	Ps L.	7,1±0,07	27,26±0,02	3,84
	Pa L.	7,3±0,06	29,27±0,02	4,01
	Pp L.	7,6±0,08	31,54±0,03	4,15
	To L.	7,8±0,05	34,47±0,03	4,42
	Qr L.	8,5±0,07	39,60±0,04	4,66
	Bp L.	8,7±0,05	42,71±0,04	4,91
	St L.	9,1±0,08	47,78±0,05	5,25
	Tc L.	9,8±0,07	53,99±0,05	5,51
	Sa L.	10,2±0,08	59,16±0,06	5,80
	Rp L.	11,3±0,09	69,04±0,06	6,11
	Ap L.	11,8±0,07	74,81±0,07	6,34
	Ah L.	13,1±0,10	84,63±0,08	6,46
	An L.	14,3±0,10	94,52±0,09	6,61
	Sv L.	15,4±0,11	102,72±0,1	6,67
Фокинский район				
	Ps L.	7,1±0,07	26,34±0,02	3,71
	Pa L.	7,3±0,06	28,32±0,03	3,88
	Pp L.	7,6±0,08	30,55±0,03	4,02
	To L.	7,8±0,05	33,46±0,03	4,29

	Qr L.	8,5±0,07	38,51±0,04	4,53
	Bp L.	8,7±0,05	41,49±0,04	4,78
	St L.	9,1±0,08	46,59±0,05	5,12
	Tc L.	9,8±0,07	52,72±0,05	5,38
	Sa L.	10,2±0,08	57,83±0,06	5,67
	Rp L.	11,3±0,09	67,57±0,07	5,98
	Ap L.	11,8±0,07	73,28±0,08	6,21
	Ah L.	13,1±0,10	82,92±0,08	6,33
	An L.	14,3±0,10	92,66±0,09	6,48
	Sv L.	15,4±0,11	100,72±0,1	6,54
Володарский район				
	Ps L.	7,1±0,07	25,42±0,02	3,58
	Pa L.	7,3±0,06	27,38±0,02	3,75
	Pp L.	7,6±0,08	29,56±0,03	3,89
	To L.	7,8±0,05	32,45±0,03	4,16
	Qr L.	8,5±0,07	37,40±0,04	4,40
	Bp L.	8,7±0,05	40,46±0,04	4,65
	St L.	9,1±0,08	45,41±0,05	4,99
	Tc L.	9,8±0,07	51,45±0,05	5,25
	Sa L.	10,2±0,08	56,51±0,06	5,54
	Rp L.	11,3±0,09	66,10±0,06	5,85
	Ap L.	11,8±0,07	71,75±0,07	6,08
	Ah L.	13,1±0,10	81,22±0,08	6,20
	An L.	14,3±0,10	90,80±0,09	6,35
	Sv L.	15,4±0,11	98,71±0,09	6,41

Таблица 2.

**Показатели содержания аминокислоты пролина в биомассе листьев
фоновых видов растений на территории г. Брянска (2023 г.)**

№ п/п	Виды растений	Содержание (M ±m) пролина, мг% на сырую массу		КУ
		д. Добрунь Брянско- го района, контроль	экспериментальные исследования	
Советский район				
	Ps L.	6,97±0,06	27,11±0,02	3,89
	Pa L.	7,16±0,06	29,14±0,03	4,07
	Pp L.	7,45±0,07	30,99±0,03	4,16
	To L.	7,63±0,07	32,27±0,03	4,23
	Bp L.	8,37±0,08	38,92±0,04	4,65
	Bp L.	8,60±0,08	43,95±0,04	5,11
	St L.	8,97±0,09	48,97±0,05	5,46
	Tc L.	9,65±0,09	55,19±0,05	5,72

	Sa L.	10,07±0,1	58,81±0,06	5,84
	Rp L.	11,16±0,1	70,87±0,07	6,35
	Ap L.	11,62±0,2	75,88±0,07	6,53
	Ah L.	12,93±0,2	84,82±0,08	6,56
	An L.	14,17±0,3	94,66±0,09	6,68
	Sv L.	15,26±0,4	103,31±0,1	6,77
Бежицкий район				
	Ps L.	6,97±0,06	26,20±0,02	3,76
	Pa L.	7,16±0,06	28,21±0,02	3,94
	Pp L.	7,45±0,07	30,02±0,03	4,03
	To L.	7,63±0,07	31,28±0,03	4,10
	Qr L.	8,37±0,08	37,83±0,04	4,52
	Bp L.	8,60±0,08	42,83±0,04	4,98
	St L.	8,97±0,09	47,81±0,05	5,33
	Tc L.	9,65±0,09	53,94±0,05	5,59
	Sa L.	10,07±0,1	57,49±0,06	5,71
	Rp L.	11,16±0,1	69,41±0,07	6,22
	Ap L.	11,62±0,2	74,67±0,07	6,40
	Ah L.	12,93±0,2	83,14±0,08	6,43
	An L.	14,17±0,3	92,81±0,09	6,55
	Sv L.	15,26±0,4	101,33±0,1	6,64
Фокинский район				
	Ps L.	6,97±0,06	25,30±0,02	3,63
	Pa L.	7,16±0,06	27,28±0,02	3,81
	Pp L.	7,45±0,07	29,06±0,03	3,90
	To L.	7,63±0,07	30,29±0,03	3,97
	Qr L.	8,37±0,08	36,74±0,04	4,39
	Bp L.	8,60±0,08	41,71±0,04	4,85
	St L.	8,97±0,09	46,64±0,05	5,20
	Tc L.	9,65±0,09	52,69±0,05	5,46
	Sa L.	10,07±0,1	56,19±0,06	5,58
	Rp L.	11,16±0,1	67,96±0,06	6,09
	Ap L.	11,62±0,2	72,86±0,07	6,27
	Ah L.	12,93±0,2	81,45±0,08	6,30
	An L.	14,17±0,3	90,97±0,09	6,42
	Sv L.	15,26±0,4	99,34±0,09	6,51
Володарский район				
	Ps L.	6,97±0,06	24,39±0,02	3,50
	Pa L.	7,16±0,06	26,35±0,02	3,68
	Pp L.	7,45±0,07	28,09±0,03	3,77
	To L.	7,63±0,07	29,30±0,03	3,84
	Qr L.	8,37±0,08	35,66±0,04	4,26

	Bp L.	8,60±0,08	40,59±0,04	4,72
	St L.	8,97±0,09	45,48±0,05	5,07
	Tc L.	9,65±0,09	51,43±0,05	5,33
	Sa L.	10,07±0,1	54,88±0,05	5,45
	Rp L.	11,16±0,1	66,51±0,06	5,96
	Ap L.	11,62±0,2	71,35±0,07	6,14
	Ah L.	12,93±0,2	79,77±0,08	6,17
	An L.	14,17±0,3	89,13±0,09	6,29
	Sv L.	15,26±0,4	97,36±0,09	6,38

По итогам 6-летних изысканий было установлено, что биомасса разных видов фоновых растений в зелёных насаждениях накапливает пролин в зависимости от видовых особенностей. Так, различия между минимальными и максимальными значениями кумуляции аминокислоты достоверно различаются, что справедливо и для контроля, и в эксперименте. Таким образом для каждой географической территории должен вестись поиск биоиндикаторов растительного происхождения, а также должны устанавливаться динамические границы концентрации маркерного вещества.

Полученные данные совпадают с результатами, полученными в других географических регионах (Туле, Москве) [1; 18]. Аналогично выявлены высокие концентрации для *Acer platanoides*, а также низкое содержание – для представителей голосеменных растений – семейства сосновых, кипарисовых. Вероятно, меньшая концентрация исследуемого биологически активного вещества у голосеменных объясняется ксерофитностью, нетребовательностью к минеральному составу почвы, что компенсируется другими механизмами стрессоустойчивости. Также для видов семейства сосновых и кипарисовых характерно достаточно высокое осмотическое давление, поэтому содержание пролина как модулятора осмотрофности, осмолита, оказывается вторично. Среднее содержание пролина выявлено для представителей семейства ивовых, берёзовых, буковых. Для физико-географических условий города Брянска выявлен вид, в биомассе которого накапливается пролин, – *Syringa vulgaris*. Вероятно, при продолжении мониторинговых исследований кустарник можно рекомендовать как биоиндикатор сочетанных условий стресса. Значения концентраций пролина в биомассе видов, отобранных в различных административных районах города различаются недостоверно, что также свидетельствует о сходной реакции видов на абиотические стрессоры.

На рисунке 5 показано содержание пролина в фитомассе древесных растений на примере Советского района и контроля. Выявляется ряд по

степени увеличения содержания аминокислоты в листьях растений, следовательно, и возрастание устойчивости к стрессам.

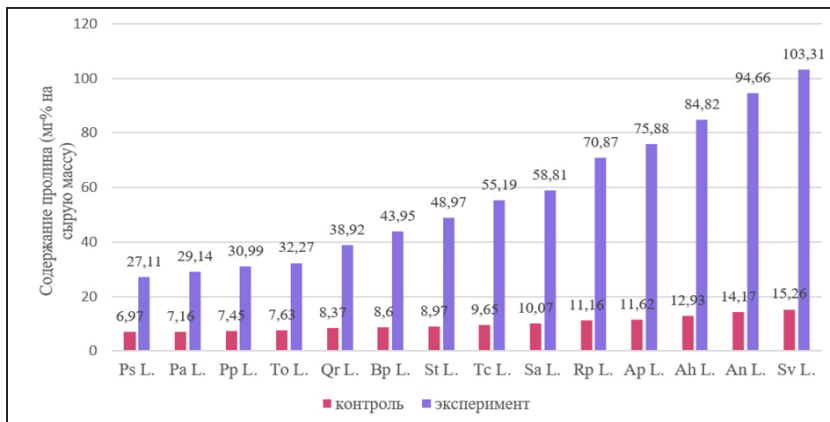


Рис. 5. Содержание пролина (мг % на сырую массу) в фитомассе древесных растений в условиях г. Брянска

Для Советского района г. Брянска составлен ряд чувствительности древесных и кустарниковых растений к аэрозагрязнению по степени уменьшения пролина: Ps L. < Pa L. < Pp L. < To L. < Qr L. < Bp L. < St L. < Tc L. < Sa L. < Rp L. < Ap L. < An L. < Ah L. < Sv L. Аналогичные тенденции отмечены для растений из других районов города.

На рисунке 6 показаны коэффициенты устойчивости (по содержанию пролина) дендрофлоры, произрастающей в 4-х районах г. Брянска.

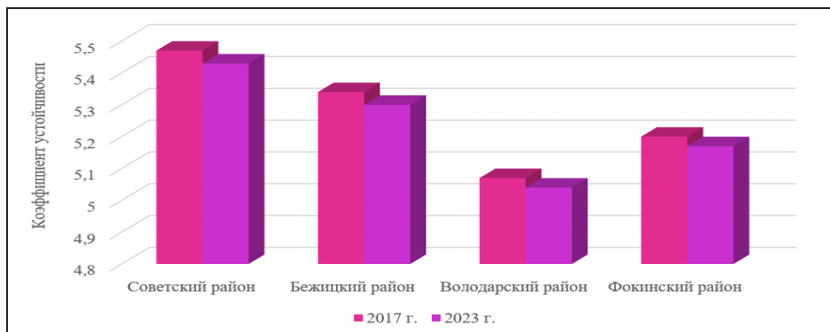


Рис. 6. Коэффициент устойчивости (по содержанию пролина, мг % на сырую массу) древесных растений в 4-х районах г. Брянска

Составлен ряд по степени уменьшения содержания аминокислоты в древесных растениях характерный для 4-х районов г. Брянска: Советский > Бежицкий > Фокинский > Володарский. Наибольшие значения КУ по концентрации пролина выявлены для широко представленных видов интродуцентов: *Syringa vulgaris*, *Acer negundo*, *Aesculus hippocastanum*, *Robinia pseudoacacia*, наименьшие – представителей семейства сосновых и кипарисовых. Следовательно, на основании расчётного индекса можно рекомендовать к массовому применению для зелёного строительства указанные виды, а также создавать соответствующие условия для произрастания видам рода сосна, ель, туя в урбозекосистемах.

Инструментальные исследования состояния атмосферного воздуха территории города и расчёт модельного индекса загрязнения атмосферы (ISA), рекомендуемого Росгидрометом для сравнительных работ, показали, что значения индекса изменялись в пределах 7,657-3,721 (повышенный), среднее значение – 5,31. Зафиксированы превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) для: NO – в 1,06-2,43 раза, NO₂ – в 1,02-1,27, формальдегида – в 1,101-2,283, SO₂ – в 1,05-3,47, H₂S – в 1,37-1,02, CO – в 1,080-2,902, NH₃ – в 1,14-1,80 раза. Инструментальные исследования показали, что в 2017/2023 гг. по степени убывания загрязнения районы города располагаются в следующем порядке: Советский > Бежицкий > Фокинский > Володарский.

Нами выявлена связь между содержанием пролина и значениями ISA в пределах точек пробоотбора административных районов, продемонстрированная в виде регрессионной связи (рисунки 7-10). Наблюдается прямая зависимость между КУ по концентрации пролина в биомассе и общим состоянием воздуха: величины достоверности аппроксимации составили 0,8478 (для Советского района города), 0,9072 (для Бежицкого района), 0,8749 (для Фокинского района), 0,8093 (для Володарского района), $F_{\text{фак}} > F_{\text{таб}}$.

Таким образом прямая зависимость между параметрами сравнения свидетельствует о том, что с увеличением степени загрязнения растёт средний КУ по содержанию пролина в биомассе фоновых растений. Эти расчёты подтверждают, что даже при воздействии невысоких доз аэротехногенных стрессов (загрязнений) содержание пролина как биологически активного вещества изменяется в сторону увеличения [16-18]. Вероятно, содержание поллютантов в воздушной среде сопровождаются ещё одним фактором накопления аминокислоты – пониженным обводнением субстратов и снижением доступности водных лимитирующих ресурсов ввиду иссушения урбиков, а также повышенным солевым загрязнением урбанозёмов.

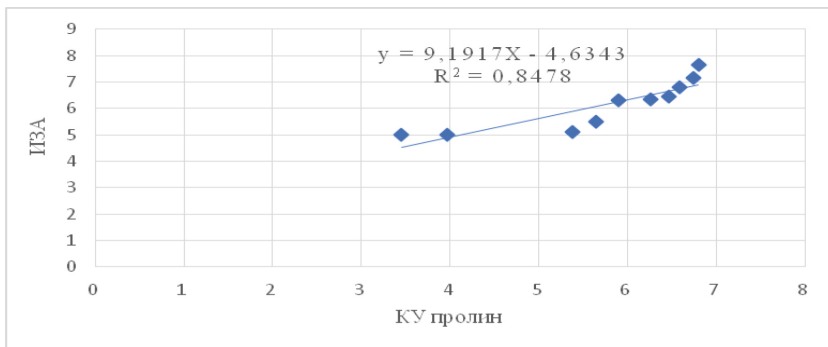


Рис. 7. Регрессионная зависимость ISA и средних значений КУ в условиях Советского района

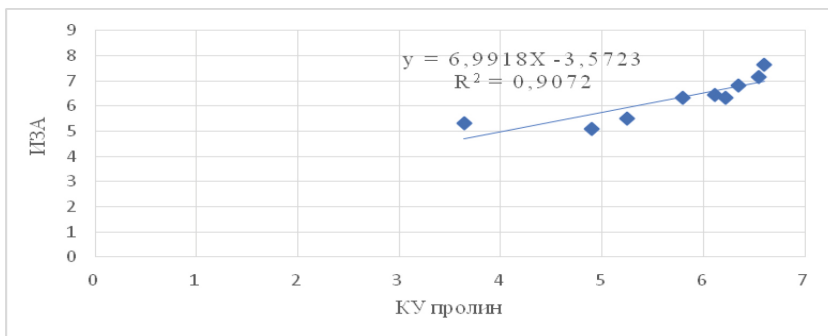


Рис. 8. Регрессионная зависимость ISA и средних значений КУ в условиях Бежицкого района

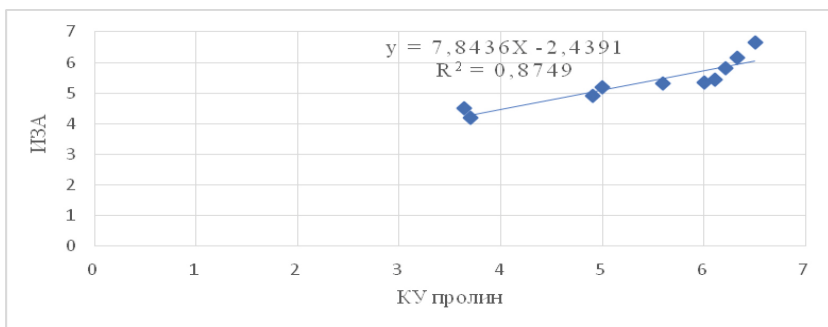


Рис. 9. Регрессионная зависимость ISA и средних значений КУ в условиях Фокинского района

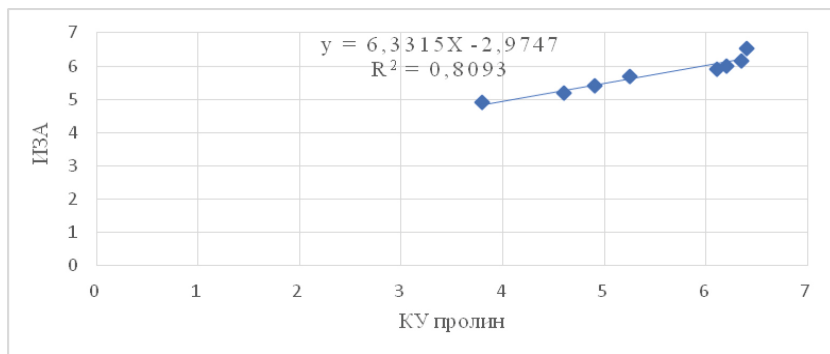


Рис. 10. Регрессионная зависимость ИЗА и средних значений КУ в условиях Володарского района

Поэтому биохимический путь адаптации растений, обитающих в экстремальных условиях местообитаний, характеризуясь многофазностью, на первых этапах проявляется усилением активности биохимических реакций, что неоднократно отмечалось для разных физико-географических условий [1; 16-19]. Также зарегистрированное по КУ значительное содержание аминокислоты связано с замедлением утилизации пролина, остановке процессов его дальнейших преобразований.

Выводы

Анализ результатов исследований показал, что содержание пролина в листьях фоновых видов древесных и кустарниковых растений в точках пробоотбора для четырёх административных районов города достоверно выше контроля в 3,57-6,78 раза ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$, $P=99\%$). Однако концентрация пролина в растениях по годам различается не достоверно ($t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$). Максимальное содержание маркерной аминокислоты в биоиндикаторах отмечена в Советском районе (104,72%), минимальная – Володарском районе (25,42 %).

Отмечено, что антропогенное загрязнение оказывает существенное влияние на изменение накопления пролина у листьев древесных растений: по сравнению с контролем наблюдается достоверное увеличение в 4,50-5,20 раза ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$, $P=99\%$). Максимальная концентрация пролина отмечена в Советском районе (80,08%), минимальная в Володарском районе (46,12%). Возрастание содержания стресс-индуцированной аминокислоты в клетках растений увеличивает устойчивость представителей видов фо-

новых растений зелёных насаждений к стрессам. Составлен ряд чувствительности древесных растений к аэрозагрязнению по степени уменьшения пролина: Ps L. < Pa L. < Pp L. < To L. < Qr L. < Bp L. < St L. < Tc L. < Sa L. < Rp L. < Ap L. < An L. < Ah L. < Sv L.

Проанализированная регрессионная прямая зависимость между индексом ISA и концентрацией маркерной аминокислоты свидетельствует о том, что с увеличением степени загрязнения растёт средний КУ по содержанию пролина в биомассе фоновых растений. Эти расчёты подтверждают, что даже при воздействии невысоких доз аэротехногенных стрессов (загрязнений) изменяется в сторону увеличения содержание биологически активного вещества – пролина.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

1. Гарифзянов А. Р. Исследование антиоксидантной системы древесных растений в условиях промышленного загрязнения: Автореф. дисс. канд.биол. наук. Пущино, 2011. 23 с.
2. ГОСТ 17.4.4.02-84. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа [Электронный ресурс] / Справ.-правовая система «КонсультантПлюс». URL: <https://www.consultant.ru/>
3. Кузнецов В.В Пролин как стресс: биологическая роль, метаболизм, регуляция // Физиология растений. 1999. Т. 46. №2. С. 32-40.
4. Маевский П. Ф. Флора средней полосы европейской части России. 11-е изд., испр. и доп. М.: Тов. науч. изд. КМК, 2014. 635 с.
5. Рогожин В.В. Практикум по биологической химии. СПб: Изд-во Лань, 2006. 256 с.
6. Руководство ЕМЕП по отбору проб и химическому анализу / пер. с англ.; под ред. А. Г. Рябошапка. Kjeller, 2001 [Электронный ресурс]. <http://tarantula.nilu.no/projects/ccc/manual/index.html>
7. Рыбальский Н.Г. Природные ресурсы и окружающая среда субъектов Российской Федерации. Центральный округ: Брянская область / Под ред. Н.Г. Рыбальского, Е.Д. Самотесова, А.Г. Митюкова. М.: НИА. Природа, 2007. 1114 с.

8. Сарбаева Е.В., Воскресенская О.Л. Оценка устойчивости древесно-кустарниковых растений в урбанизированной среде // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 2. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9011>
9. Табаленкова Г.Н., Малышев Р.В., Кузиванова О.А., Атоян М.С. Сезонные изменения содержания растворимых белков и свободных аминокислот в почвах некоторых древесных растений // *Растительные ресурсы*. 2019. Т. 55. № 1. С. 113-121.
10. Тарчевский И.А., Егорова А.М. Участие пролина в адаптации растений к действию стресс-факторов и его использование в агробиотехнологии (обзор) // *прикладная биохимия и микробиология*. 2022. Т. 58. № 4. С. 315-329.
11. Чупахина Г.Н. Физиологические и биохимические методы анализа растений. Калининград: Изд-во Калининградского университета, 2000. 59 с.
12. Alotaibi M. D., Alharbi B. H., Al-Shamsi M. A., Alshahrani T. S., Al-Namazi A. A., Alharbi S. F., Alotaibi F. S., Qian Y. Assessing the response of five tree species to air pollution in Riyadh City, Saudi Arabia, for potential green belt application // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 29156–29170. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09226-w>
13. Anake W. U., Eimanehi J. E., Omonhinmin C. A. Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of selected plant species // *Indonesian Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 19(1). P. 239–244. <https://doi.org/10.22146/ijc.35270>
14. Bharti S. K., Trivedi A., Kumar N. Air pollution tolerance index of plants growing near an industrial site // *Urban Climate*. 2018. Vol. 24. P. 820–829. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.007>
15. Cao X., Wu L., Wu M., Zhu C., Jin Q., Zhang J. Abscisic acid mediated proline biosynthesis and antioxidant ability in roots of two different rice genotypes under hypoxic stress // *BMC Plant Biol*. 2020. Vol. 20. № 1. Article number: 198. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02414-3>
16. Dutta T., Neelapik N.R.R., Wani S.H., Surekha C. Plant Signaling Molecules. Role and Regulation Under Stressful Environments / Ed. M. Iqbal R. Khan P. Sudhakar Reddy, A. Ferrante, N. Khan. Elsevier, 2019. P. 459–477. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816451-8.00029-0>
17. Kavi Kishor P.B., Kumari P.H. Sunita M.S., Sreenivasulu N. Role of proline in cell wall syntesis and plant development and its implications in plant ontogeny // *Front. Plant Sci*. 2015. Vol. 6. P. 544–549. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00544>
18. Meena M., Divyanshu K., Kumar S., Swapnil P., Zehra A., Shukla V., Yadav M., Upadhyay R.S. Regulation of L-proline biosynthesis , signal transduction,

- transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions // *Heliyon*. 2019. Vol. 5(12). e02952. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02952>
19. Takahashi F., Kuromori T., Urano K., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. Drought Stress Responses and Resistance in Plants: From Cellular Responses to Long-Distance Intercellular Communication // *Front. Plant Sci.* 2020. Vol. 11. P. 1407. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.556972>
 20. Tak A. A., Kakde U. B. Evaluation of air pollution tolerance and performance index of plants growing in industrial areas // *International Journal of Ecology and Environmental Science*. 2020. Vol. 2(2). P. 1-9.
 21. Viradia S., Kaneria M., Misan V. Comparative assessment of air pollution tolerance index (APTI) of selected plants from two different industrial sites of Rajkot // *Proceeding of the National Conference on Innovations in Biological Sciences (NCIBS)*. 2020. P. 109–117. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3559975>

References

1. Garifzyanov A. R. *Research of antioxidant system of woody plants in conditions of industrial pollution*. Pushchino, 2011, 23 p.
2. GOST 17.4.4.02-84. Methods of selection and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis. *ConsultantPlus*. URL: <https://www.consultant.ru/>
3. Kuznetsov V.V. Proline as a stress: biological role, metabolism, regulation. *Plant Physiology*, 1999, vol. 46, no. 2, pp. 32-40.
4. Maevsky P.F. *Flora of the middle zone of the European part of Russia*. Moscow: KMK, 2014, 635 p.
5. Rogozhin V.V. *Practicum on biological chemistry*. SPb: Izd-vo Lan, 2006, 256 p.
6. *EMEP Manual on sampling and chemical analysis* / translated from English; ed. by A. G. Ryaboshapko. Kjeller, 2001. <http://tarantula.nilu.no/projects/ccc/manual/index.html>
7. Rybalsky N.G. *Natural resources and environment of the subjects of the Russian Federation. Central District: Bryansk Oblast* / Edited by N.G. Rybalsky, E.D. Samotesov, A.G. Mityukov. Moscow: NIA. Nature, 2007, 1114 p.
8. Sarbaeva E.V., Voskresenskaya O.L. Estimation of the stability of tree and shrub plants in the urbanized environment. *Modern problems of science and education*, 2013, no. 2. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9011>
9. Tabalenkova G.N., Malyshev R.V., Kuzivanova O.A., Atoyan M.S. Seasonal changes in the content of soluble proteins and free amino acids in the soils of some woody plants. *Plant Resources*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 113-121.

10. Tarchevsky I.A., Egorova A.M. Participation of proline in plant adaptation to the action of stress factors and its use in agrobiotechnology (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 315–329.
11. Chupakhina G.N. *Physiological and biochemical methods of plant analysis*. Kaliningrad: Izd-vo Kaliningrad University, 2000, 59 p.
12. Alotaibi M. D., Alharbi B. H., Al-Shamsi M. A., Alshahrani T. S., Al-Namazi A. A., Alharbi S. F., Alotaibi F. S., Qian Y. Assessing the response of five tree species to air pollution in Riyadh City, Saudi Arabia, for potential green belt application. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 29156–29170. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09226-w>
13. Anake W. U., Eimanehi J. E., Omonhinmin C. A. Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of selected plant species. *Indonesian Journal of Chemistry*, 2019, vol. 19(1), pp. 239–244. <https://doi.org/10.22146/ijc.35270>
14. Bharti S. K., Trivedi A., Kumar N. Air pollution tolerance index of plants growing near an industrial site. *Urban Climate*, 2018, vol. 24, pp. 820–829. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.007>
15. Cao X., Wu L., Wu M., Zhu C., Jin Q., Zhang J. Abscisic acid mediated proline biosynthesis and antioxidant ability in roots of two different rice genotypes under hypoxic stress. *BMC Plant Biol.*, 2020, vol. 20, no. 1. Article number: 198. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02414-3>
16. Dutta T., Neelap K.N.R., Wani S.H., Surekha C. *Plant Signaling Molecules. Role and Regulation Under Stressful Environments* / Ed. M. Iqbal R. Khan P. Sudhakar Reddy, A. Ferrante, N. Khan. Elsevier, 2019, pp. 459–477. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816451-8.00029-0>
17. Kavi Kishor P.B., Kumari P.H. Sunita M.S., Sreenivasulu N. Role of proline in cell wall synthesis and plant development and its implications in plant ontogeny. *Front. Plant Sci.*, 2015, vol. 6, pp. 544–549. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00544>
18. Meena M., Divyanshu K., Kumar S., Swapnil P., Zehra A., Shukla V., Yadav M., Upadhyay R.S. Regulation of L-proline biosynthesis, signal transduction, transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions. *Heliyon.*, 2019, vol. 5(12), e02952. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02952>
19. Takahashi F., Kuromori T., Urano K., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. Drought Stress Responses and Resistance in Plants: From Cellular Responses to Long-Distance Intercellular Communication. *Front. Plant Sci.*, 2020, vol. 11, p. 1407. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.556972>

20. Tak A. A., Kakde U. B. Evaluation of air pollution tolerance and performance index of plants growing in industrial areas. *International Journal of Ecology and Environmental Science*, 2020, vol. 2(2), pp. 1-9.
21. Viradia S., Kaneria M., Misan V. Comparative assessment of air pollution tolerance index (APTI) of selected plants from two different industrial sites of Rajkot. *Proceeding of the National Conference on Innovations in Biological Sciences (NCIBS)*, 2020, pp. 109–117. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3559975>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Нестеренко Виктория Михайловна, аспирант кафедры географии, экологии и землеустройства

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»

*ул. Бежицкая, 14, г. Брянск, 241036, Российская Федерация
vivo.mih@gmail.com*

Москаленко Игорь Владимирович, кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры географии, экологии и землеустройства

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»

*ул. Бежицкая, 14, г. Брянск, 241036, Российская Федерация
moskalenkigor@yandex.ru*

Авраменко Марина Васильевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры географии, экологии и землеустройства

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»

*ул. Бежицкая, 14, г. Брянск, 241036, Российская Федерация
avramenko_marina84@mail.ru*

Анищенко Лидия Николаевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры географии, экологии землеустройства *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»*
*ул. Бежицкая, 14, г. Брянск, 241036, Российская Федерация
lanishchenko@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Victoria M. Nesterenko, Graduate Student of the Department of Geography, Ecology and Land Management
*Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky
14, Bezhitskaya Str., Bryansk, 241036, Russian Federation
vivo.mih@gmail.com*

Igor V. Moskalenko, Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer at the Department of Geography, Ecology and Land Management
*Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky
14, Bezhitskaya Str., Bryansk, 241036, Russian Federation
moskalenkigor@yandex.ru*

Marina V. Avramenko, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Geography, Ecology and Land Management
*Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky
14, Bezhitskaya Str., Bryansk, 241036, Russian Federation
avramenko_marina84@mail.ru*

Lidiya N. Anishchenko, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Geography, Land Management Ecology
*Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky
14, Bezhitskaya Str., Bryansk, 241036, Russian Federation
lanishchenko@mail.ru*

Поступила 16.12.2023

После рецензирования 05.02.2024

Принята 22.02.2024

Received 16.12.2023

Revised 05.02.2024

Accepted 22.02.2024