

ВЗАИМОСВЯЗЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ И НАДЗЕМНОЙ БИОМАССЫ РАСТЕНИЙ ТРАВЯНО-КУСТАРНИЧКОВОГО ЯРУСА В ЭКОСИСТЕМЕ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА

Исследование посвящено взаимосвязям между функциональными признаками листьев, высотой и надземной биомассой растений травяно-кустарничкового яруса лесной экосистемы карбонового полигона в Зеленодольском районе Республики Татарстан. Обнаружена значительная изменчивость функциональных признаков растений на исследованных участках, что может быть связано с такими факторами среды как освещенность, влажность почвы и содержание в ней элементов питания растений. Показано, что через функциональные признаки доминантных видов растений можно охарактеризовать то, как они занимают объем своего яруса. Наличие взаимосвязей между функциональными признаками растений и надземной биомассой подчеркивает их существенное влияние на продуктивность экосистемы. Отмечается необходимость комплексного подхода, учитывающего функциональные характеристики растений различных ярусов.

Ключевые слова: карбоновый полигон; лесные экосистемы; функциональные признаки растений; травяно-кустарничковый ярус; продуктивность экосистемы.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.22.29>

Введение

Научные подходы, основанные на функциональных признаках, все больше способствуют установлению связи между изменениями окружающей среды и изменчивостью растительных сообществ (Lavorel, Garnier, 2002).

Лист является важным органом растений, служащим для трансформации солнечной энергии в биологическую посредством фотосинтеза (Garnier et al., 2001). Размер листьев, их количество, функциональные признаки и фотосинтетическая способность тесно связаны с размерами растений и конкурентными способностями в растительных сообществах (Funk, Cornwell, 2013).

Удельная площадь листьев (SLA), определяемая как площадь листьев на единицу сухой массы, является одним из наиболее широко изученных признаков в экологии растений (Garnier, 1991). SLA является ключевым признаком, который описывает компромиссы между структурными характеристиками листа, накоплением углерода и содержанием питательных веществ, отражая положение видов растений в спектре продуцирования и сохранения биомассы (Wright et al., 2004).

Высота растений оценивается как расстояние от верхней границы основных фотосинтетически активных тканей растения до поверхности субстрата (Cornelissen et al., 2003). Научные исследования подтверждают, что высота растений коррелирует с другими их характеристиками, такими

как диаметр стебля, площадь среза корней, длина корней и общая надземная биомасса (Cornelissen et al., 2003; Osada, 2011).

Понимание корреляций между функциональными признаками листьев, высотой растений и надземной биомассой имеет важное прикладное значение. Функциональные признаки, связанные с высоким накоплением биомассы, позволяют лучше оценить потенциал экосистем по поглощению углерода. Изучение этих корреляций может улучшить прогноз реакции экосистем на изменение климата и другие экологические нарушения. В первую очередь внимание стоит уделить подробной оценке годичного цикла углерода, ответственного за баланс важнейших парниковых газов – углекислого газа и метана.

Республика Татарстан относится к числу наиболее развитых промышленных и сельскохозяйственных регионов России, где проживает более 3 млн. человек, поэтому проблеме мониторинга парниковых газов здесь уделяется большое внимание. В соответствии с приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 05.02.2021 №74 «О создании на территории регионов России карбоновых полигонов для разработки и испытательных технологий контроля углеродного баланса, системы мониторинга парниковых газов в экосистемах России» вблизи г. Казани в естественных условиях создан карбоновый полигон с целью наблюдения за антропогенной и естественной эмис-

сией парниковых газов.

Цель настоящей статьи – определить возможность оценки функции поглощения углерода экосистемой карбонового полигона через связи между функциональными признаками листьев, высотой растений и надземной биомассой.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на территории Зеленодольского района Республики Татарстан на окраине карбонового полигона «Карбон – Поволжье». Полигон расположен в широколиственном лесу, состоящим из волосисто-осокового липняка с елью и дубом на дерново-подзолистых почвах, сформированных на аллювиально-делювиальных четвертичных отложениях третьей надпойменной террасы р. Волга, испытывающей антропогенное давление средней интенсивности.

В работе использовался материал, собранный во время пика вегетационного периода (середина июля 2023 года) с травяно-кустарничкового яруса четырех пробных площадок (ПП) размером 25×25 м. Видовой состав травяно-кустарничкового яруса и баллы проективного покрытия приводятся в таблице 1.

Для исследования были взяты функциональные признаки четырех доминирующих видов, которые в совокупности составляют не менее 75% от общего покрытия сообщества (Cornelissen et al., 2003): сныть обыкновенная (*Aegodium podagraria*), осока волосистая (*Carex pilosa*), страусник обыкновенный (*Matteuccia struthiopteris*), пролесник многолетний (*Mercurialis perennis*). Баллы обилия пересчитаны в проценты проективного покрытия по методике Б.А. Быкова (Быков, 1978), для сор3 – 50%, для сор2 – 12%, для сор1 – 2.4%.

Отбор и измерение признаков проводили в соответствии с международным протоколом измерений функциональных признаков (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Измеряли листья и высоты хорошо сформированных растений каждого вида в экологических условиях, соответствующих их обычным местообитаниям. Для каждого вида проводили 25 измерений.

Высоту (h) измеряли в метрах, как кратчайшее расстояние от верхней границы фотосинтетических тканей (верхнего хорошо развитого листа) до субстрата. Листья собирали в гербарные сетки, и в условиях стационара проводили измерения площади и массы листьев. Площадь листьев (LA, см²) измеряли при помощи приложения Easy Leaf Area для ОС Android (Easlon, Bloom, 2014). Массу свежих (LM, г) и сухих (LDW, мг) листьев измеряли при помощи электронных весов DEMCOM

DL-103 с точностью до 0.001 г.

Удельную площадь листовой поверхности (SLA, см²/г) и содержание сухого вещества в листьях (LDMC, мг/г) рассчитывали по измеренным функциональным признакам листьев. Удельную площадь листовой поверхности измеряли как отношение площади листа к его сухой массе, а содержание сухого вещества как отношение сухой массы листа к его сырой массе.

Средневзвешенные по сообществу значения (CWM) признаков рассчитаны для каждой площадки. Для расчетов взяты значения признаков листьев и высота растений. Формула для расчета CWM признаков (Garnier et al., 2004):

$$CWM = \sum_{i=1}^S p_i \times trait_i$$

где S – общее число видов, p_i – относительное проективное покрытие вида i , $trait_i$ – значение признака вида i .

Для количественной оценки сухой биомассы растительности травяно-кустарничкового яруса проведен сбор всей надземной травянистой биомассы на трех площадках размером 0.5×0.5 м, случайным образом распределенных в пределах пробных площадок.

Статистическая обработка данных и построение модели выполнены в программной среде R (R Core Team, 2022). Проверку на нормальность распределения проводили с помощью теста Шапиро-Уилка. Все изученные параметры листьев имели нормальное распределение. Для оценки скоррелированности CWM признаков с надземной биомассой рассчитывали коэффициент корреляции Спирмена.

Результаты и их обсуждение

Измеренные средние значения функциональных признаков растений травяно-кустарничкового яруса исследуемых площадок приведены в таблице 2. Так, для сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria*) более низкие значения признаков (площади листа, массы листа и др.) характерны для ПП 2, по сравнению с площадками 1 и 3. Например, наибольшая площадь листа у сныти наблюдается на ПП 3, а наименьшая на ПП 2, а наибольшая масса листа у сныти характерна для растений с ПП 3, а наименьшая со ПП 2. В свою очередь, наибольшая сухая масса листа у сныти отмечалась на ПП 2, а наименьшая на ПП 1. SLA сныти минимальна на ПП 2, максимальна на ПП 1. ПП 2 характеризуется более высоким значением высоты растений по сравнению с другими площадками.

Для осоки волосистой (*Carex pilosa*) можно

Таблица 1. Видовой состав и баллы обилия растений травяно-кустарничкового яруса пробных площадок (ПП)

Table 1. Species composition and abundance scores of herbaceous-shrub layer plants of the plotted sites

Вид Species	Баллы обилия по Друде-Уранову Abundance scores by Drude-Uranov			
	ПП 1 Plot 1	ПП 2 Plot 2	ПП 3 Plot 3	ПП 4 Plot 4
Страусник обыкновенный <i>Matteuccia struthiopteris</i>	cop3	cop3	sp	cop2
Сныть обыкновенная <i>Aegopodium podagraria</i>	cop2	cop2	cop2	sp
Копытень европейский <i>Asarum europaeum</i>	sp	sp	sp	sp
Подмаренник душистый <i>Galium odoratum</i>	sp	–	sp	sol
Медуница неясная <i>Pulmonaria obscura</i>	sp	sp	–	sp
Хвощ полевой <i>Equisetum arvense</i>	sp	sp	–	–
Лютик кашубский <i>Ranunculus cassubicus</i>	sp	–	–	sol
Осока волосистая <i>Carex pilosa</i>	cop 2	cop2	cop2	sp
Вороний глаз четырёхлистный <i>Paris quadrifolia</i>	sp	sp	sol	sol
Пролесник многолетний <i>Mercurialis perennis</i>	cop3	cop2	cop2	cop3
Кочедыжник женский <i>Athyrium filix-femina</i>	sp	sp	–	–
Крапива двудомная <i>Urtica dioica</i>	–	sp	–	sp
Будра плющевидная <i>Glechoma hederacea</i>	–	sp	–	sp
Купена многоцветковая <i>Polygonatum multiflorum</i>	–	sp	sp	un
Гравилат городской <i>Geum urbanum</i>	–	sp	un	sol
Яснотка крапчатая <i>Lamium maculatum</i>	–	sp	sp	sp
Чистец лесной <i>Stachys sylvatica</i>	–	sp	–	–
Борец северный <i>Aconitum septentrionale</i>	–	–	sol	sol
Фиалка удивительная <i>Viola mirabilis</i>	–	–	sol	un
Бор развесистый <i>Millium effusum</i>	–	–	sp	sp

отметить, что более низкие значения признаков, таких как площадь листа и масса листа, характерны для ПП 2 по сравнению с площадками 1 и 3. Наибольшая площадь листа у осоки наблюдается на ПП 3, в то время как на ПП 2 она существенно меньше. Аналогично, наибольшая масса листа отмечается на ПП 2, а наименьшая на ПП 1. Сухая масса листа также имеет минимальное значение на ПП 1 и максимальное на ПП 2. Относительная площадь листа (SLA) минимальна на ПП 2 и максимальна на ПП 3. Касательно высоты растений (h), наименьшее значение наблюдается на ПП 1, в то время как на ПП 3 она наибольшая.

Страусник обыкновенный (*Matteuccia struthiopteris*) демонстрирует различия признаков в зависимости от площадки. Наименьшая площадь листа наблюдается на ПП 2, в то время как на ПП 1 этот параметр достигает максимального значения. Максимальная масса листа также наблюдается на ПП 1, а минимальная масса

листа – на ПП 2. Сухая масса листа достигает максимального значения на ПП 1 и минимального – на ПП 4. Относительная площадь листа (SLA) максимальна на ПП 1 и минимальна на ПП 2. Высота растений (h) имеет минимальное значение на ПП 2 и максимальное на ПП 4.

Пролесник многолетний (*Mercurialis perennis*) характеризуется различиями в биометрических характеристиках в зависимости от площадки. Наименьшая площадь листа наблюдается на ПП 2, в то время как на ПП 1 этот параметр достигает максимального значения. Максимальная масса листа также наблюдается на ПП 1, а минимальная – на ПП 3. Сухая масса листа достигает максимального значения на ПП 1 и минимального значения на ПП 2. Относительная площадь листа (SLA) минимальна на ПП 2 и максимальна на ПП 1. Высота растений (h) имеет минимальное значение на ПП 3 и максимальное на ПП 4.

Индивидуальные значения признаков обнаруживают большую изменчивость от

площадки к площадке, что может свидетельствовать о неоднородных условиях произрастания и различной реакции индивидов на внешние факторы, такие как освещенность, содержание влаги и питательных веществ в почве. Уместно будет провести анализ функциональных признаков не выделяя площадки, как уникальные единицы со своими факторами и условиями, а объединить их и рассматривать их как одно сообщество, в нашем случае волосисто-осокового липняка с елью и дубом.

Растения в различных фитоценозах используют разный объем воздушной среды, который прямо связан с высотой растений. Высокие растения, как правило, доминируют в захвате света, эффективно конкурируя за ограниченные световые ресурсы. Малый объем среды (низкие растения) используется более равномерно, нежели большой, то есть дивергенция по высоте растений выше

в луговых сообществах, где сильнее выражены конкурентные взаимоотношения и выше уровень продукции (Дудова и др., 2019). В свою очередь в лесных сообществах более широкий диапазон высот (большая высота растений) дает большую возможность для дифференциации растений по этому признаку и способствует расхождению их экологических ниш (Costa et al., 2017; Рогова и др., 2022).

Интересно посмотреть, как проявляется ярусность среди доминантов травяно-кустарничкового яруса и какие признаки наилучшим образом ее характеризуют. На рисунке 1 приводятся боксплоты с усредненными значениями признаков доминантных видов травяно-кустарничкового яруса волосисто-осокового липняка с елью и дубом.

Функциональные признаки листьев, такие как LA, LM и LDW, могут быть связаны с аллометрическими факторами (например, размер растения) и экологической стратегией в отношении питательного стресса и возмущений окружающей среды. Наблюдаемая картина позволяет предположить наличие четко выраженной ярусности растений по признакам листьев. В самом нижнем ярусе находится осока волосистая (LA 26 см², LM 0.26 г, LDW 90 мг) и пролесник (23 см², 0.22 г, 51 мг), чуть выше них располагается сныть (137 см², 1.5 г, 333 мг), и выше всех находится страусник, чьи площадь и масса листьев самые высокие (471 см², 5 г, 1293 мг).

Максимальная высота растения связана с формой роста, положением вида в вертикальном

Таблица 2. Средние значения признаков доминирующих видов, а также надземной биомассы травяно-кустарничкового яруса пробных площадок

Table 2. Mean values of dominant species traits, as well as aboveground biomass of the herbaceous-shrub layer of the plotted sites

Вид Species	Признак Trait	ПП 1 Plot 1	ПП 2 Plot 2	ПП 3 Plot 3	ПП 4 Plot 4
Сныть обыкновенная <i>Aegopodium podagraria</i>	LA, см ²	154.47 ± 8.46	82.69 ± 8.24	163.45 ± 16.56	–
	LM, г	1.49 ± 0.11	0.89 ± 0.09	1.95 ± 0.25	–
	LDW, мг	306 ± 22	358 ± 28	348 ± 38	–
	SLA, см ² /г	522.03 ± 16.03	272.12 ± 35.11	488.86 ± 18.57	–
	LDMC, мг/г	208.47 ± 5.44	487.77 ± 54.95	191.98 ± 7.29	–
	h, м	0.22 ± 0.01	0.31 ± 0.01	0.25 ± 0.01	–
Осока волосистая <i>Carex pilosa</i>	LA, см ²	23.48 ± 1.73	27.95 ± 1.59	28.51 ± 1.97	–
	LM, г	0.19 ± 0.02	0.33 ± 0.03	0.25 ± 0.02	–
	LDW, мг	88 ± 8	99 ± 8	85 ± 7	–
	SLA, см ² /г	279.95 ± 16.08	327.13 ± 32.63	364.26 ± 27.18	–
	LDMC, мг/г	493.76 ± 35.09	331.56 ± 30.37	342.47 ± 21.31	–
	h, м	0.24 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.31 ± 0.01	–
Страусник обыкновенный <i>Matteuccia struthiopteris</i>	LA, см ²	582.05 ± 20.06	353.98 ± 22.13	–	477.92 ± 26.18
	LM, г	5.25 ± 0.22	5.84 ± 0.48	–	5.13 ± 0.26
	LDW, мг	1377 ± 67	1361 ± 82	–	1141 ± 71
	SLA, см ² /г	445.86 ± 29.37	303.16 ± 38.27	–	432.38 ± 19.79
	LDMC, мг/г	272.23 ± 17.05	276.47 ± 28.14	–	230.63 ± 15.41
	h, м	0.45 ± 0.02	0.47 ± 0.01	–	0.76 ± 0.04
Пролесник многолетний <i>Mercurialis perennis</i>	LA, см ²	29.01 ± 1.71	20.76 ± 0.94	24.31 ± 2.09	21.01 ± 1.45
	LM, г	0.21 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.26 ± 0.02	0.18 ± 0.02
	LDW, мг	58 ± 4	44 ± 5	55 ± 6	47 ± 4
	SLA, см ² /г	506.04 ± 6.42	611.17 ± 72.04	500.43 ± 37.08	456.01 ± 10.47
	LDMC, мг/г	271.28 ± 7.12	195.59 ± 23.58	200.04 ± 12.19	294.49 ± 15.41
	h, м	0.31 ± 0.01	0.28 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.33 ± 0.01
Биомасса, г/м ² Biomass, g/m ²		35.78 ± 16.32	40.41 ± 3.12	74.84 ± 22.23	66.41 ± 18.71

Условные обозначения: LA – площадь листа; LM – масса листа; LDW – сухая масса листа; LDMC – содержание сухого вещества в листе; SLA – удельная площадь поверхности листа; h – высота растения.

Legend: LA – leaf area (cm²); LM – leaf mass(g); LDW – leaf dry weight (mg); LDMC – leaf dry matter content (mg/g); SLA – specific leaf area (cm²/g); height – plant height (m).

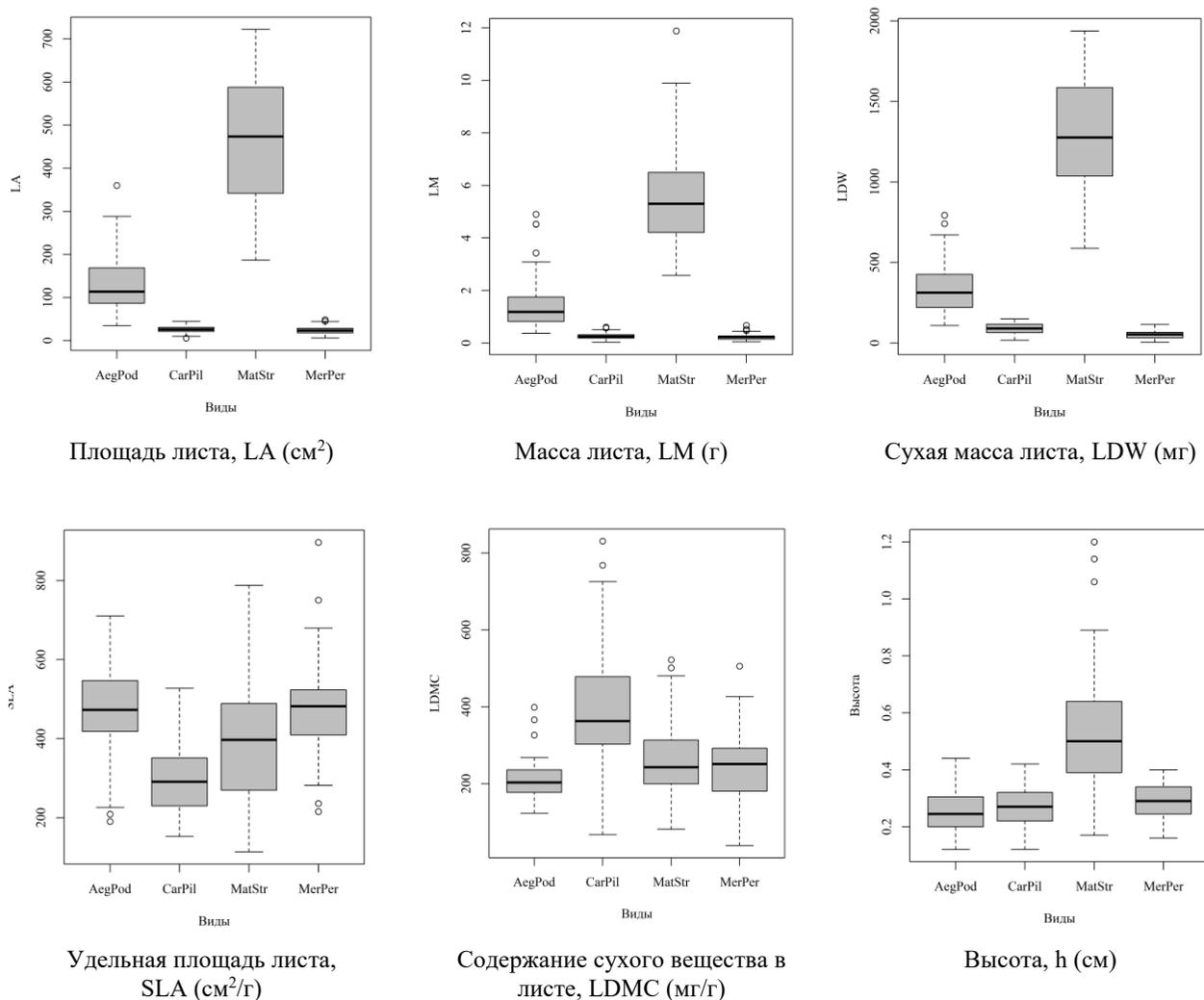


Рис. 1. Средние значения признаков доминантных видов растений травяно-кустарничкового яруса волосисто-осокового липняка с елью и дубом

Fig. 1. Mean values of traits in dominant plant species of the herbaceous-shrub layer *Carex pilosa*-*limber* forest with spruce and oak

AegPod – *Aegopodium podagraria*, *CarPil* – *Carex pilosa*, *MatStr* – *Matteuccia stuthiopteris*, *MerPer* – *Mercurialis perennis*

градиенте освещенности и его конкурентной способностью. Среди всех доминантов травяно-кустарничкового яруса страусник характеризуется наибольшей высотой (0.54 м). Остальные доминанты значительно ниже, их высоты находятся в диапазоне от 0.25 до 0.28 м. Можно предположить, что такая разница в высоте растений связана с конкуренцией за солнечный свет, тем самым прослеживается выраженная ярусная структура среди видов-доминантов травяно-кустарничкового яруса.

Ввиду того, что SLA зависит от содержания сухого вещества в листьях, LDMC может вносить вклад в SLA в зависимости от среды обитания и рассматриваемой группы растений. В травянистых растениях, произрастающих в умеренном климате, низкая SLA, как правило, связана с высоким содержанием сухого вещества в листьях.

Так, сныть, страусник и пролесник характеризуются высокими значениями SLA (427, 393 и 518 см²/г, соответственно), но низкими значениями LDMC (296, 259 и 240 мг/г, соответственно), а для осоки волосистой характерны низкие значения SLA (323 см²/г) и высокие значения LDMC (389 мг/г). Для SLA и LDMC не характерна выраженная ярусность, что объясняется участием этих признаков в процессах накопления биомассы и водно-углеродных циклах, а не конкурентной борьбой за факторы окружающей среды.

Продуктивность экосистемы, то есть скорость накопления органического вещества, определяется прежде всего наличием или отсутствием высокопродуктивных видов, а не разнообразием и взаимодополняемостью видов (Cardinale et al., 2007). Установлено, что средневзвешенные значения признаков растений, составляющих сообщества,

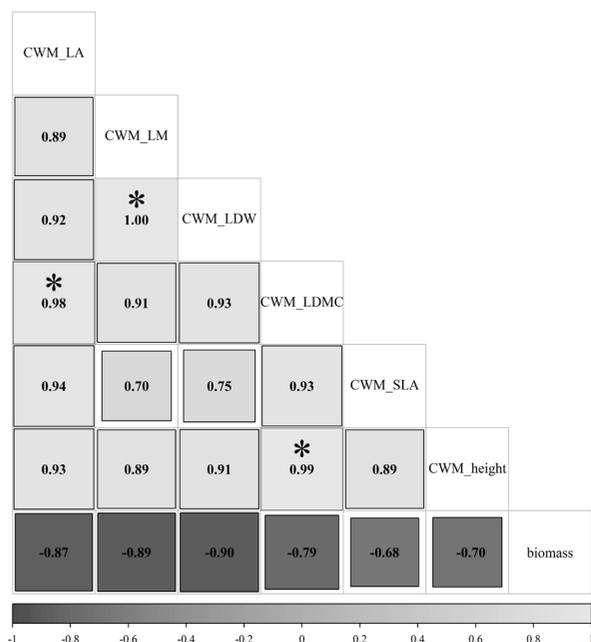


Рис. 2. Коэффициенты корреляции между величиной биомассы и средневзвешенными значениями функциональных признаков

Условные обозначения: CWM – средневзвешенное среднее по сообществу; LA – площадь листа, см²; LM – масса листа, г; LDW – сухая масса листа, мг; LDMC – содержание сухого вещества в листе, мг/г; SLA – удельная площадь поверхности листа, см²/г; height – высота растения, м; biomass – биомасса, г/м²; * – статистически значимое значение. Чем меньше квадрат – тем меньше коэффициент корреляции

Fig. 2. Correlation coefficients between biomass value and community weighted mean of functional traits

Legend: CWM – community weighted mean; LA – leaf area, cm²; LM – leaf mass, g; LDW – leaf dry weight, mg; LDMC – leaf dry matter content, mg/g; SLA – specific leaf area, cm²/g; height – plant height, m; biomass – g/m²; * – statistically significant value. The smaller the square – the smaller is the correlation coefficient

коррелируют с надземной растительной биомассой (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Результаты проведенных корреляционных тестов приведены на рисунке 2.

Положительная связь между собой характерна для всех CWM функциональных признаков. Во всех случаях корреляционная связь сильная, кроме связей между SLA и сухой и CWM сырой массой. Статистически значимая связь наблюдается для следующих показателей: площадь листа и LDMC, сухая и сырая масса листа, LDMC и высота растения. Для всех взаимосвязей между биомассой и функциональными признаками характерна отрицательная, статистически не значимая связь, сильная для всех признаков, кроме SLA.

Наличие сильных положительных связей между функциональными признаками листьев и высотой растений травяно-кустарничкового яруса могут говорить о том, что лесные сообщества бо-

лее функционально структурированы. Очевидно, это является результатом длительного сосуществования многолетних видов лесного сообщества и успешной дифференциацией их экологических ниш.

Несмотря на отсутствие статистически значимых связей, мы обнаружили определенные тенденции, связанные с зависимостью биомассы от функциональных признаков. Важно отметить, что все функциональные признаки травяно-кустарничкового яруса в лесных сообществах демонстрируют сильные положительные взаимосвязи с биомассой этого яруса. Вероятно, долгосрочные взаимодействия между видами в относительно стабильных лесных сообществах, которые сильно зависят от деревьев-доминантов, способствуют формированию функциональной иерархии в этом ярусе, что, в свою очередь, сказывается на его продуктивности.

Очевидно, что функциональные характеристики видов в травяно-кустарничковом ярусе, хоть и имеющем второстепенное значение в лесных сообществах, не могут служить индикаторами продукционных процессов в этом ярусе без учета особенностей видов в древесном ярусе, которые играют важную роль в освоении ресурсов и накоплении биомассы.

Заключение

Исследованы функциональные признаки растений в травяно-кустарничковом ярусе волосисто-осокового липняка с елью и дубом в пределах карбонового полигона, расположенного в Зеленодольском районе Республики Татарстан. Анализ различий между пробными площадками выявил их значительную изменчивость.

Разные виды доминантов занимают разные ярусы в сообществе, в основном эти различия в высоте связаны с их конкурентными способностями и использованием доступного света. Это свидетельствует о длительных взаимодействиях между видами и долгосрочной совместной эволюции в лесных сообществах.

Исследована взаимосвязь между функциональными признаками растений и надземной растительной биомассой. Положительная сильная связь между собой характерна для всех CWM функциональных признаков, кроме связей между SLA, сухой и сырой массой. Для всех взаимосвязей между биомассой и функциональными признаками характерна в основном сильная отрицательная связь, что подчеркивает их влияние на продуктивность экосистемы.

Важно отметить, что функциональные характеристики растений в травяно-кустарничковом

ярус не могут быть рассмотрены изолированно от древесных видов, которые также играют ключевую роль в экосистеме. Экологическая сложность лесных экосистем требует комплексного подхода.

Таким образом, представляется возможным дальнейшая оценка функции поглощения углерода экосистемой карбонового полигона, используя связи между функциональными признаками листьев, высотой растений всех ярусов лесного сообщества и надземной биомассой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ и Кабинета Министров Татарстана в рамках научного проекта №22-27-20080.

Список литературы

1. Быков Б.А. Геоботаника. Алма-Ата: Наука, 1978. 287 с.
2. Дудова К.В., Атабаллыев Г.Г., Ахметжанова А.А., Гулов Д.М., Дудов С.В., Елумеева Т.Г., Кипкеев А.М., Логвиненко О.А., Семенова Р.Б., Смирнов В.Э., Текеев Д.К., Салпагаров М.С., Онипченко В.Г. Опыт изучения функционального разнообразия альпийских сообществ на примере анализа высоты растений // Журнал общей биологии. 2019. Т. 80, №6. С. 439–450. doi: 10.1134/S0044459619050038.
3. Рогова Т.В., Сауткин И.С., Шайхутдинова Г.А. Проверка гипотез зависимости продуктивности растительных сообществ от видового и функционального разнообразия // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. 2022. Т. 164, №1. С. 76–93. doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.76-93.
4. Cardinale B.J., Wright J.P., Cadotte M.W., Carroll I.T., Hector A., Srivastava D.S., Loreau M., Weis J.J. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 2007. Vol. 104, №46. P. 18123–18128. doi: 10.1073/pnas.0709069104.
5. Cornelissen J.H.C., Lavorel S., Garnier E., Díaz S., Buchmann N., Gurvich D.E., Reich P.B., ter Steege H., Morgan H.D., van der Heijden M.G.A., Pausas J.G., Poorter H. A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide // Australian journal of botany. 2003. Vol. 51. P. 335–380. doi:10.1071/BT02124.
6. Costa D.S., Gerschlauer F., Pabst H., Kuhnel A., Huwe B. Community-weighted means and functional dispersion of plant functional traits along environmental gradients on Mount Kilimanjaro // Journal of vegetation science. 2017. Vol. 28, №4. P. 684–695. doi:10.1111/jvs.12542.
7. Easlon H.M., Bloom A.J. Easy leaf area: automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area // Applications in plant sciences. 2014. Vol. 2, №7. P. 1400033.
8. Funk J.L., Cornwell W.K. Leaf traits within communities: context may affect the mapping of traits to function // Ecology. 2013. Vol. 94. P. 1893–1897. doi: 10.1890/12-1602.1.
9. Garnier E. Resource capture, biomass allocation and growth in herbaceous plants // Trends in ecology and evolution. 1991. Vol. 6. P. 126–131. doi: 10.1016/0169-5347(91)90091-B.
10. Garnier E., Cortez J., Billes G., Navas M.-L., Roumet C., Debussche M., Laurent G., Blanchard A., Aubry D., Bellmann A., Neill C., Toussaint J.-P. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession // Ecology. 2004. Vol. 85, №9. P. 2630–2637. doi: 10.1890/03-0799.
11. Garnier E., Shipley B., Roumet C., Laurent G. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and

leaf dry matter content // Functional ecology. 2001. Vol. 15, №5. P. 688–695.

12. Lavorel S., Garnier E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail // Functional ecology. 2002. Vol. 16, №5. P. 545–556. doi: 10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x.

13. Osada N. Height-dependent changes in shoot structure and tree allometry in relation to maximum height in four deciduous tree species // Functional ecology. 2011. Vol. 25, №4. P. 777–786. doi:10.1111/j.1365-2435.2011.01833.x.

14. Perez-Harguindeguy N., Diaz S., Garnier E., Lavorel S., Poorter H., Jaureguiberry P., Bret-Harte M.S., Cornwell W.K., Craine J.M., Gurvich D.E., Urcelay C., Veneklaas E.J., Reich P.B., Poorter L., Wright I.J., Ray P., Enrico L., Pausas J. G., de Vos A.C., Buchmann N., Funes G., Quétier F., Hodgson J.G., Thompson K., Morgan H.D., ter Steege H., Sack L., Blonder B., Poschod P., Vaieretti M.V., Conti G., Staver A.C., Aquino S., Cornelissen J.H.C. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide // Australian journal of botany. 2013. Vol. 61, №3. P. 167–234. doi: 10.1071/BT12225.

15. R Core Team. R (2023): A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria // URL: <https://www.R-project.org> (дата обращения: 12.10.2023).

16. Wright I.J., Reich P.B., Westoby M., Ackerly D.D., Baruch Z., Bongers F., Cavender-Bares J., Chapin T., Cornelissen J.H.C., Diemer M., Flexas J., Garnier E., Groom P.K., Gulias J., Hikosaka K., Lamont B.B., Lee T., Lee W., Lusk C., Midgley J.J., Navas M.-L., Niinemets Ü., Oleksyn J., Osada N., Poorter H., Poot P., Prior L., Pyankov V.I., Roumet C., Thomas S.C., Tjoelker M.G., Veneklaas E.J., Villar R. The worldwide leaf economics spectrum // Nature. 2004. Vol. 428. P. 821–827. doi: 10.1038/nature02403.

References

1. Bykov B.A. Geobotanika [Geobotany]. Alma-Ata: Nauka, 1978. 287 p.
2. Dudova K.V., Ataballyev G.G., Ahmetzhanova A.A., Gulov D.M., Dudov S.V., Elumeeva T.G., Kipkeev A.M., Logvinenko O.A., Semenova R.B., Sмирнов V.E., Tekeev D.K., Salpaгарov M.S., Onipchenko V.G. Opyt izuchenija funkcional'nogo raznoobrazija al'pijskih soobshhestv na primere analiza vysoty rastenij [Functional diversity of alpine plant communities: A case study of plant height] // Zhurnal obshhej biologii [Biology Bulletin Reviews]. 2019. Vol. 80, No 6. P. 439–450. doi: 10.1134/S0044459619050038.
3. Rogova T.V., Sautkin I.S., Shajhutdinova G.A. Proverka gipotez zavisimosti produktivnosti rastitel'nyh soobshhestv ot vidovogo i funkcional'nogo raznoobrazija [Testing hypotheses of plant community productivity dependence on species and functional diversity] // Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Serija Estestvennye nauki [Proceedings of Kazan University. Natural Sciences]. 2022. Vol. 164, No 1. P. 76–93. doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.76-93
4. Cardinale B.J., Wright J.P., Cadotte M.W., Carroll I.T., Hector A., Srivastava D.S., Loreau M., Weis J.J. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 2007. Vol. 104, No 46. P. 18123–18128. doi: 10.1073/pnas.0709069104.
5. Cornelissen J.H.C., Lavorel S., Garnier E., Diaz S., Buchmann N., Gurvich D.E., Reich P.B., ter Steege H., Morgan H.D., van der Heijden M.G.A., Pausas J.G., Poorter H. A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide // Australian journal of Botany. 2003. Vol. 51. P. 335–380. doi:10.1071/BT02124.

6. Costa D.S., Gerschlauber F., Pabst H., Kuhnel A., Huwe B. Community-weighted means and functional dispersion of plant functional traits along environmental gradients on Mount Kilimanjaro // *Journal of Vegetation Science*. 2017. Vol. 28, No 4. P. 684–695. doi:10.1111/jvs.12542.

7. Easlon H.M., Bloom A.J. Easy Leaf Area: Automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area // *Applications in plant sciences*. 2014. Vol. 2, No 7. P. 1400033.

8. Funk J.L., Cornwell W.K. Leaf traits within communities: context may affect the mapping of traits to function // *Ecology*. 2013. Vol. 94. P. 1893–1897. doi: 10.1890/12-1602.1.

9. Garnier E. Resource capture, biomass allocation and growth in herbaceous plants // *Trends in ecology and evolution*. 1991. Vol. 6. P. 126–131. doi: 10.1016/0169-5347(91)90091-B.

10. Garnier E., Cortez J., Billes G., Navas M.-L., Roumet C., Debussche M., Laurent G., Blanchard A., Aubry D., Bellmann A., Neill C., Toussaint J.-P. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession // *Ecology*. 2004. Vol. 85, No 9. P. 2630–2637. doi: 10.1890/03-0799.

11. Garnier E., Shipley B., Roumet C., Laurent G. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content // *Functional ecology*. 2001. Vol. 15, No 5. P. 688–695.

12. Lavorel S., Garnier E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail // *Functional ecology*. 2002. Vol. 16, No 5. P. 545–556. doi: 10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x.

13. Osada N. Height-dependent changes in shoot structure and tree allometry in relation to maximum height in four deciduous tree species // *Functional ecology*. 2011. Vol. 25, No 4. P. 777–786. doi:10.1111/j.1365-2435.2011.01833.x.

14. Perez-Harguindeguy N., Díaz S., Garnier E., Lavorel S., Poorter H., Jaureguiberry P., Bret-Harte M.S., Cornwell W.K., Craine J.M., Gurvich D.E., Urcelay C., Veneklaas E.J., Reich P.B., Poorter L., Wright I.J., Ray P., Enrico L., Pausas J. G., de Vos A.C., Buchmann N., Funes G., Quétier F., Hodgson J.G., Thompson K., Morgan H.D., ter Steege H., Sack L., Blonder B., Poschlod P., Vaieretti M.V., Conti G., Staver A.C., Aquino S., Cornelissen J.H.C. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide // *Australian journal of botany*. 2013. Vol. 61, No 3. P. 167–234. doi: 10.1071/BT12225.

15. R Core Team. R (2023): A language and environment for

statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria // URL: <https://www.R-project.org> (accessed: 12.10.2023).

16. Wright I.J., Reich P.B., Westoby M., Ackerly D.D., Baruch Z., Bongers F., Cavender-Bares J., Chapin T., Cornelissen J.H.C., Diemer M., Flexas J., Garnier E., Groom P.K., Gulias J., Hikosaka K., Lamont B.B., Lee T., Lee W., Lusk C., Midgley J.J., Navas M.-L., Niinemets Ü., Oleksyn J., Osada N., Poorter H., Poot P., Prior L., Pyankov V.I., Roumet C., Thomas S.C., Tjoelker M.G., Veneklaas E.J., Villar R. The worldwide leaf economics spectrum // *Nature*. 2004. Vol. 428. P. 821–827. doi: 10.1038/nature02403.

Sautkin I.S., Kutuzova A.S. Relationship between functional traits and aboveground biomass of plants forest floor in the ecosystem of the carbon polygon.

The study is devoted to the relationship between the functional traits of leaves, height and aboveground biomass of plants of the forest floor ecosystem of the carbon polygon in the Zelenodolsky district of the Republic of Tatarstan. Significant variability of plant functional traits in different studied plots was found, which might be related to environmental factors such as light, soil moisture and nutrition. The article argues that through the functional traits of dominant plant species, it is possible to characterize how they occupy the volume of their layer. The article describes positive relationships between plant functional traits and aboveground biomass, emphasizing their important influence on ecosystem productivity. It is noted that an integrated approach is needed that also takes the functional characteristics of plants of other layers, including trees.

Keywords: carbon polygon; forest ecosystems; plant functional traits; forest floor; ecosystem productivity.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 02.11.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 17.11.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 05.12.2023

Сведения об авторах

Сауткин Илья Сергеевич, кандидат биологических наук, ассистент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: sautkin.ilia@gmail.com.

Кутузова Анастасия Сергеевна, лаборант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: nastya.kutuzova.0234@gmail.com.

Information about the authors

Ilia S. Sautkin, PhD in Biology, Assistant, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: sautkin.ilia@gmail.com.

Anastasia S. Kutuzova, Laboratory Assistant, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: nastya.kutuzova.0234@gmail.com.

