

Использование многомерного анализа для оценки аллелопатической активности *Quercus robur* L., *Acer plantanoides* L., *Ulmus glabra* Huds. в естественных и искусственных фитоценозах Южного Урала

© 2025. И. А. Гетманец, д. б. н., зав. кафедрой,
Д. Ю. Нохрин, к. б. н., доцент,
П. В. Левченко, ст. преподаватель,
Челябинский государственный университет,
454001, Россия, г. Челябинск, ул. Бр. Кашириных, д. 129,
e-mail: igetmanec@mail.ru

Изучена аллелопатическая активность *Quercus robur*, *Acer plantanoides*, *Ulmus glabra* в природных реликтовых сообществах и лесных насаждениях Южного Урала, а также вклад факторов: агенты переноса – вытяжки из листьев, листового опада, корневых выделений; тип местообитания (естественное/искусственное), концентрация водных вытяжек (1:100, 1:50, 1:25, 1:10); вид растения-донора (*Q. robur*, *A. plantanoides*, *U. glabra*), влияющих на дисперсию показателей аллелопатического воздействия. В ходе классических лабораторных опытов исследованы различные сочетания пар видов в системе донор-акцептор и оценена аллелопатическая активность по ростовым реакциям (всхожесть и длина корня) классических тест-объектов *Lepidium sativum* L., *Linum usitatissimum* L., *Viola tricolor* L. Время экспозиции составило 120 ч, при освещении с фотопериодом в 15 ч дневного режима и температурой 21 ± 1 °C. Получен массив первичных морфометрических измерений (720 показателей).

Для оценки вклада факторов, определяющих аллелопатическую активность растений-доноров использована многомерная статистическая техника – анализ избыточности (Redundancy analysis). Статистическая значимость эффектов подтверждена в ходе рандомизационной процедуры при $p \leq 0,05$. На основе первичных показателей объяснено влияние каждого фактора в вариацию значений аллелопатической активности. Установлена иерархия регрессоров (факторов) по вкладу в дисперсию показателей аллелопатической активности. Воздействие агентов переноса является статистически значимым ($F_{(2/69)} = 18,91$; $p < 0,001$) и демонстрирует вклад в дисперсию показателей всхожести и длины корня растений-акцепторов на 35,4%. Регрессор – вид-донор определяет меньшую вариабельность (16,0%) выше приведённых показателей растений-акцепторов при статистической значимости ($F_{(2/69)} = 6,58$; $p < 0,001$). Многомерный анализ подтвердил статистически значимую обратную зависимость между концентрацией водных вытяжек всех видов-доноров и ингибирующим эффектом на прорастание семян биотестов. Минимальный вклад в дисперсию выявлен у регрессора – тип местообитания. В градиенте между естественными и искусственными сообществами вклад в вариацию составляет 1,95% и не является статистически значимым. Таким образом, показана целесообразность использования многомерного статистического анализа для сравнения аллелопатического влияния.

Ключевые слова: биотесты, регрессоры, агенты переноса, анализ избыточности, аллелопатия, доноры, акцепторы, естественные и искусственные сообщества.

Assessment of *Quercus robur* L., *Acer plantanoides* L., and *Ulmus glabra* Huds. allelopathic activity in natural and artificial phytocenoses of the Southern Urals using multivariate analysis

© 2025. I. A. Getmanets ORCID: 0000-0003-0370-2019[†]
D. Y. Nokhrin ORCID: 0000-0002-4920-2338[†]
P. V. Levchenko ORCID: 0000-0002-4467-8038[†]
Chelyabinsk State University,
129, Br. Kashirinykh St., Chelyabinsk, Russia, 454001,
e-mail: igetmanec@mail.ru

The *Quercus robur*, *Acer plantanoides*, *Ulmus glabra* allelopathic activity in natural relict communities and forest plantations of the Southern Urals was studied. We also examined the contribution of factors affecting the variance of allelopathic transfer indicators. Among them are transfer agents (extracts from leaves, leaf fall, root zone soil), habitat

type (natural/artificial), concentration of water extracts (1:100, 1:50, 1:25, 1:10), and type of donor plant species (*Q. robur*, *A. platanoides*, *U. glabra*). Various combinations of species pairs in the donor–acceptor system were studied in classical laboratory experiments. Allelopathic activity was evaluated by growth responses (germination and root length) of classical test subjects *Lepidium sativum* L., *Linum usitatissimum* L., *Viola tricolor* L. The exposure time was 120 h, under illumination with a photoperiod of 15 h of daylight and temperature 21 ± 1 °C. An array of primary morphometric measurements (720 indicators) was obtained.

Multivariate statistical technique – Redundancy analysis – was used to evaluate the contribution of factors determining allelopathic activity of donor plants. Statistical significance of the effects was confirmed by randomisation procedure at $p \leq 0.05$. The effect of each factor in the variation of allelopathic activity values is explained based on primary indicators. The hierarchy of regressors (factors) by contribution to the variance of allelopathic activity indicators was established. The impact of transfer agents is statistically significant ($F_{(2/69)} = 18.91; p < 0.001$) and demonstrates a contribution to the variance of germination and root length indices of acceptor plants by 35.4%. Regressor – donor species – determines less variability (16.0%) of the above indicators of acceptor plants at statistical significance ($F_{(2/69)} = 6.58; p < 0.001$). Multivariate analysis confirmed a statistically significant inverse relationship between the concentration of aqueous extracts of all donor species and the inhibitory effect on seed germination of the biotests. The minimum contribution to the variance was found for the regressor, habitat type. In the gradient between natural and artificial communities, the contribution to variance is 1.95% and is not statistically significant. Thus, the feasibility of using multivariate statistical analysis to compare allelopathic effect is shown.

Keywords: biotests, regressors, transfer agents, redundancy analysis, allelopathy, donors, acceptors, natural and artificial communities.

Аллелопатия играет важную роль в жизни лесных экосистем, поскольку является фактором, влияющим на их состав, структуру, функции [1–4]. Поэтому изучение феномена аллелопатии способствует решению практических задач облесения и управления смешанными насаждениями, что обуславливает устойчивое лесопользование [5, 6].

К настоящему времени накоплен достоверный материал об аллелопатических взаимоотношениях растений в лесных экосистемах. Показано, что аллелопатически активные вещества корневых систем, листьев и листового опада могут стимулировать либо угнетать рост и развитие видов-акцепторов [1, 7–9]. Причём, как считают некоторые исследователи, изучение аллелопатических эффектов целесообразно проводить в границах естественных экосистем и в экотонах искусственных фитоценозов [7, 8, 12].

Выявлено, что воздействия аллелохимикатов проявляются на разных уровнях изучения морфологической организации реципиентов, например, на молекулярном уровне – в накоплении в клетке активного кислорода под действием катехина и других фенолов и хинонов [6, 10, 11]. На клеточном и тканевом уровнях продемонстрировано блокирование аллелохимикатами ферментов запасных веществ, влияние на структурную организацию компонентов клетки и её деление [12]. На биоморфологическом уровне показана поливариантность развития систем монокарпического побега и изменение онтогенетической траектории акцептора [13].

Несмотря на разнообразие подходов к изучению аллелопатической активности, веду-

щими остаются классические лабораторные методы (метод биотестов), позволяющие получать массивы первичных морфометрических измерений всхожести семян и длины корня. Последние можно интерпретировать по шкале условных кумариновых единиц [1, 8]. Лабораторные методы позволяют исследовать различные сочетания пар видов в системе донор-акцептор и исключить действие факторов, постоянно действующих на растительный организм в естественной среде [8]. При этом исследователи, как правило, получают большие объёмы числовых данных. В связи с этим возникает объективная необходимость проанализировать их одновременно, оценить вклад каждого фактора в аллелопатический эффект, его статистическую значимость, что можно выполнить с использованием многомерного анализа [14, 15].

Цель настоящей статьи – выявление с использованием многомерного анализа статистической значимости аллелопатических эффектов *Q. robur*, *A. platanoides*, *U. glabra* в естественных и искусственных фитоценозах Южного Урала в зависимости от вклада каждого типа регрессора.

Объекты и методы исследования

Выбор объектов исследования обусловлен различным ценотическим поведением и аллелопатической активностью и эколого-фитоценологической приуроченностью в однородных в физико-географическом отношении условиях территориального выдела.

Полевые исследования проведены в пределах двух широтных географических

зон: лесной – на территории особо охраняемых природных объектов (Нязепетровский и Ашинский районы) и лесостепной – в искусственных насаждениях г. Челябинска с эдификаторами древесного яруса – *Q. robur*, *A. platanoides*, *U. glabra*.

На пробных площадях 100 м² отобраны листья, пробы листового опада и почвы прикорневой зоны исследуемых доноров в соответствии с методикой [1]. Водные экстракты готовили, смешивая листья, листового опада и почву с дистиллированной водой в соотношении 1:10 по массе, настаивали вытяжки 24 ч в темноте. Такое соотношение характеризуется низкой степенью растворимости, и позволяет продемонстрировать аллелопатические эффекты [11]. Далее полученные экстракты разбавляли дистиллированной водой в соотношениях 1:100, 1:50, 1:25 и 1:10. В лабораторных опытах взяты семена классических тест-объектов *Lepidium sativum* L., *Linum usitatissimum* L., *Viola tricolor* L., чувствительность которых к аллелопатически активным веществам продемонстрирована во многих исследованиях [1, 2, 10]. Семена (по 15 шт. каждого вида) проращивали в 10 мл вытяжки всех четырёх концентраций и контроле

с дистиллированной водой при освещении с фотопериодом в 15 ч дневного режима и температурой 21±1 °С. Опыт закладывали в предварительно простерилизованных чашках Петри в трёхкратной повторности для каждого варианта. Ежедневно определяли всхожесть семян по формуле [(число проросших семян) / (число посеянных семян)] · 100% [1] и длину корней проростков в мм. Общее время экспозиции 120 ч.

Статистическая обработка данных проведена путём анализа избыточности, в котором факторами, влияющими на дисперсию показателей (регрессорами), выступали: тип местообитания (естественное/искусственное); концентрация водных вытяжек (1:100, 1:50, 1:25, 1:10); агенты переноса (листья, листового опада, почва прикорневой зоны); вид растений-доноров (*Q. robur*, *A. platanoides*, *U. glabra*).

Статистическую значимость зависимости показателей от факторов в Redundancy analysis (RDA) проводили в рандомизационном варианте дисперсионного анализа (permutation ANOVA, *n*=9999); значимыми считали эффекты при *p*≤0,05. Расчёты выполнены в пакете vegan (version 2.6–4 [16]) для программно-статистической среды R, version 4.3.1 [17].

Таблица 1 / Table 1

Всхожесть семян *Viola tricolor* L. (в %) под воздействием водных вытяжек листьев, листового опада и корневых выделений из естественных и искусственных сообществ
Germination of *Viola tricolor* L. seeds (in %) under the influence of aqueous extracts of leaves, leaf litter and soil in their natural and artificial communities

Регрессоры Regressors	Показатели, % / Indicators, %											
	Растения-доноры / Donor plants											
	Клён / Maple <i>Acer platanoides</i> L.				Вяз / Elm <i>Ulmus glabra</i> Huds.				Дуб / Oak <i>Quercus robur</i> L.			
Естественное местообитание / Natural locality												
Концентрация раствора / Solution concentration	1:100	1:50	1:25	1:10	1:100	1:50	1:25	1:10	1:100	1:50	1:25	1:10
Агенты переноса / Transfer agents												
Листья / Leaves	59,0	48,6	37,2	29,4	62,0	53,5	39,4	29,0	12,0	0,0	0,0	0,0
Опад / Leaf litter	100	88,0	76,4	68,0	80,0	62,2	55,0	43,0	60,4	24,6	0,0	0,0
Корневые выделения Root excretions	86,0	80,0	69,3	50,5	89,0	86,3	80,0	97,6	72,0	67,9	52,8	50,0
Искусственное местообитание / Artificial locality												
Концентрация раствора Solution concentration	1:100	1:50	1:25	1:10	1:100	1:50	1:25	1:10	1:100	1:50	1:25	1:10
Агенты переноса / Transfer agents												
Листья / Leaves	69,8	46,1	41,8	35,3	55,0	41,9	32,3	27,6	66,0	43,1	20,2	14,3
Опад / Leaf litter	100	92,7	81,4	70,4	98,0	83,4	68,8	58,0	78,2	44,0	10,0	7,5
Корневые выделения Root excretions	83,8	83,1	79,8	69,2	80,0	84,3	88,0	92,7	35,0	31,3	21,9	0,0

Результаты и обсуждение

В качестве примера полученных данных в таблице 1 приведён их фрагмент с информацией по всхожести семян фиалки трёхцветной.

Сложность применения классического дисперсионного анализа обусловлена сочетанием двух обстоятельств. Во-первых, все абиотические факторы в условиях проведенного опыта были контролируемы для выявления именно аллелопатического влияния. Во-вторых, эксперимент проводили в трёхкратной повторности. Эти обстоятельства диктуют необходимость использовать многофакторные модели дисперсионного анализа с фиксированными эффектами и единственным наблюдением на ячейку комплекса: либо четырёхфакторную, которая должна применяться 6 раз (3 растения-акцептора \times 2 показателя: всхожесть и длина главного корня), либо ещё более сложные – вплоть до шестифакторной, с факторами: местообитание (2 градации фактора искусственные и естественные насаждения), растения-доноры (3), концентрация водной вытяжки (4), агенты переноса (3), растения-акцепторы (3) и показатели (2).

Если бы все факторы в модели были случайными, то в качестве ошибки в таком комплексе можно было бы использовать их взаимодействие, которое возможно вычислить, но нельзя оценить статистически. Зато в результате были бы получены значения F -критерия и p -значения для всех главных эффектов и всех взаимодействий. Если бы только часть факторов в модели были случайными, то оценить статистическую значимость большинства эффектов в комплексе всё равно удалось бы на основе декомпозиции сумм квадратов по Сэттервейту [18].

Однако в случае исключительно фиксированных факторов провести статистическую оценку невозможно даже для главных эффектов. Поэтому мы прибегли к технике многомерного анализа – анализу избыточности – которая позволяет, во-первых, проанализировать весь массив данных одновременно, а во-вторых, оценить статистическую значимость эффектов с использованием рандомизационной процедуры Монте-Карло.

Анализ избыточности (RDA) относится к группе ординационных, или проекционных методов, призванных объяснить изменчивость большого числа наблюдаемых признаков меньшим числом рассчитанных на их основе ненаблюдаемых (латентных) переменных [14, 15]. Самым известным методом этой группы

является анализ главных компонент (PCA), который относится экологами к методам непрямого градиентного анализа, поскольку блок средовых факторов не задействуется в анализе напрямую, а главные компоненты, рассчитанные на основе ковариаций или корреляций признаков (численность видов и другие показатели) могут интерпретироваться уже только после анализа – путём поиска связей между компонентами и факторами [19]. В отличие от PCA, RDA является методом прямого градиентного анализа, который асимметрично обрабатывает два блока показателей: блок независимых показателей – регрессоров (факторов) и блок зависящих от них откликов (показателей). Поэтому анализ избыточности объясняет не всю присущую набору признаков изменчивость (количественно – дисперсию), а только ту её часть, которая напрямую определяется регрессорами [6, 19]. В нашем случае такими регрессорами были 4 фактора, представленные в таблице 1, а откликами – всхожесть и длина корня трёх растений-акцепторов, т. е. 6 показателей. Рассмотрим вклад каждого регрессора в порядке уменьшения доли объясняемой им дисперсии.

Агенты переноса. Этот регрессор является самым сильным предиктором (прогностический параметр) варибельности показателей растений-акцепторов: более чем на треть (35,4%) определяет дисперсию их всхожести и длины корня, а само влияние было высоко статистически значимым ($F_{(2/69)} = 18,91; p < 0,001$). Поскольку предикторов было 3 (листья, опад и корневые выделения), в анализе возможно выделение двух осей RDA, но практически всё их влияние (96,3%) объяснялось только первой осью. На рисунке 1 представлен сдвоенный график (биplot) ординационной диаграммы этого влияния, на котором регрессоры представлены векторами, а отклики – значками. Такая диаграмма интерпретируется аналогично методу анализа главных компонент: находящиеся по одну сторону от нуля по данной оси векторы коррелируют между собой положительно, по разные стороны – отрицательно. Точки объектов группируются рядом с теми векторами, которые влияют на них наиболее сильно.

Как видно из рисунка 1, вдоль первой оси проявилось отличие влияния смывов с листьев от воздействия экстракта листового опада и особенно – корневых выделений. Для первых агентов переноса наблюдались наиболее низкие значения длины корней и особенно – всхожести, то есть вытяжки ока-

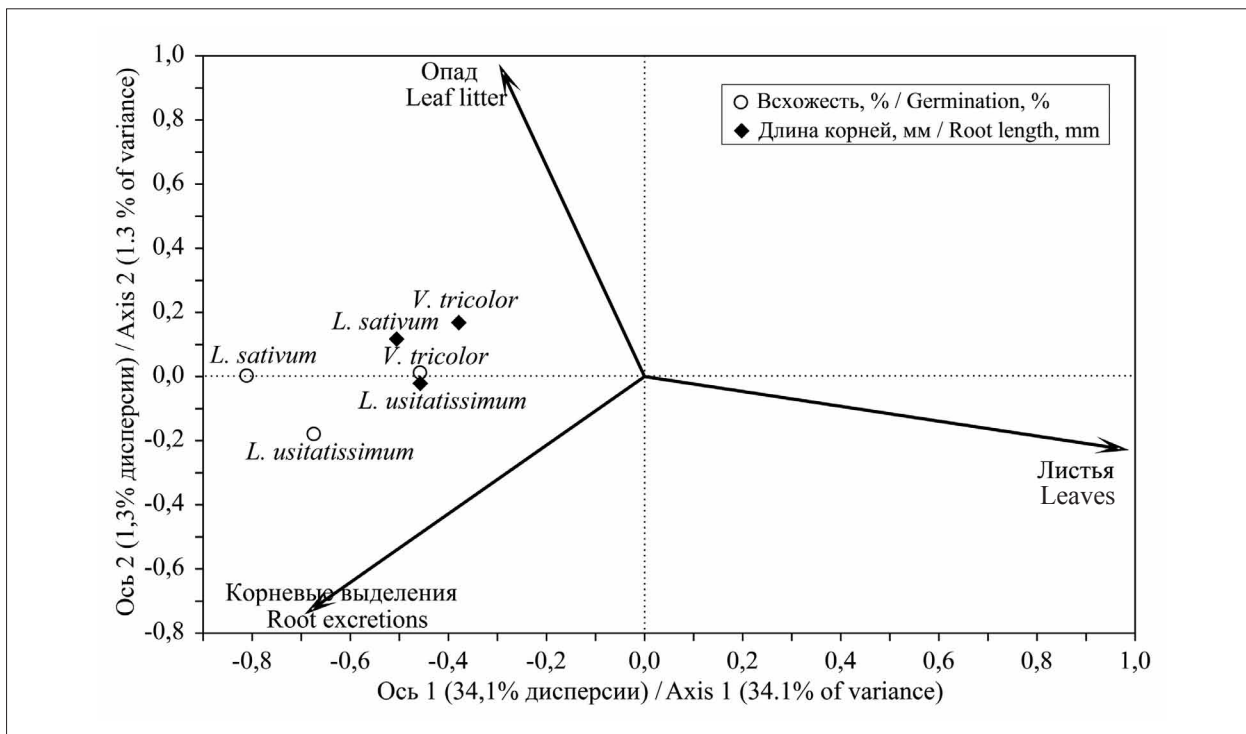


Рис. 1. Всхожесть и длина корня растений-акцепторов в пространстве агентов переноса анализа избыточности / Fig. 1. Germination and root length of acceptor plants in the space of transfer agents of redundancy analysis

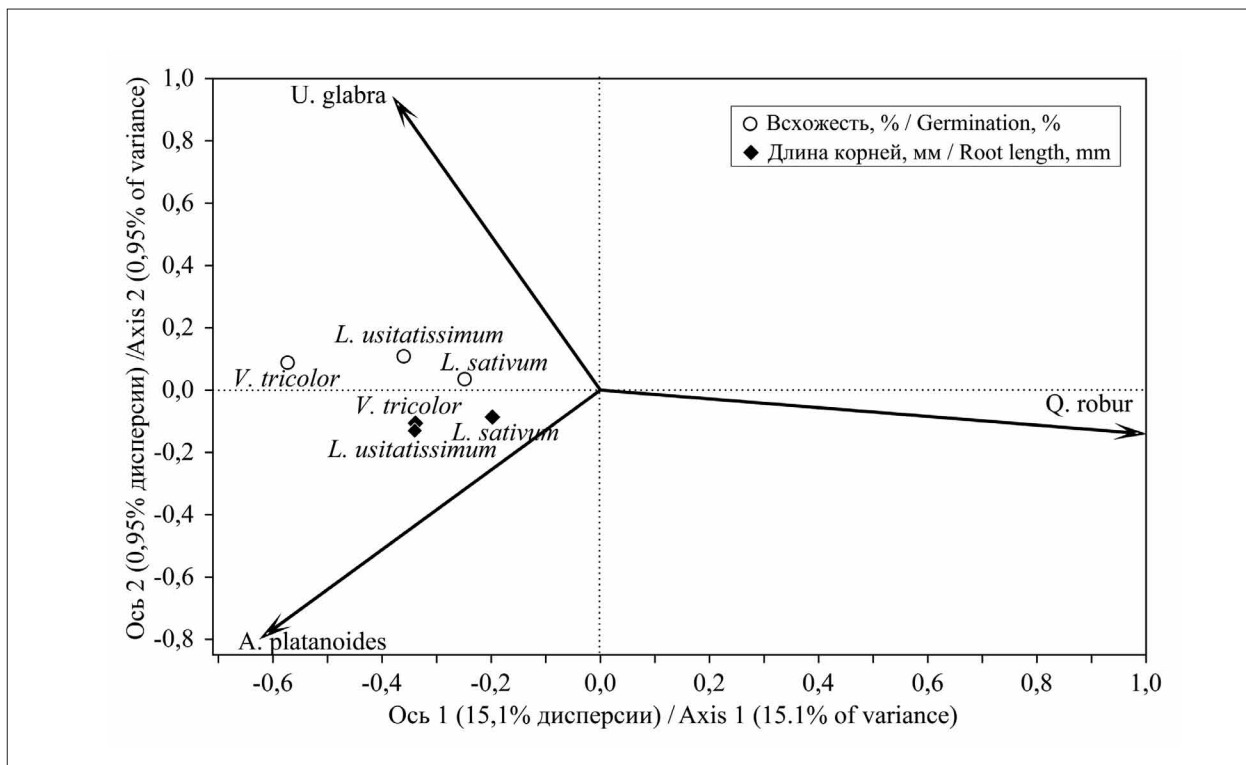


Рис. 2. Всхожесть и длина корня растений-акцепторов в пространстве растений-доноров анализа избыточности / Fig. 2. Germination and root length of acceptor plants in the space of donor plants of redundancy analyses

зали максимальный ингибирующий эффект. Водные вытяжки опада и корневых выделений оказали меньшее воздействие на *L. sativum*, *L. usitatissimum*.

Растения-доноры. Несколько меньшее влияние на дисперсию показателей оказал выбор растений-доноров. Вклад данного регрессора в вариабельность составляет 16,0% и является статистически значимым ($F_{(2/69)}=6,58$; $p<0,001$). Как и с воздействием агентов переноса, влияние растений-доноров объясняется первой осью (15,07% из 16,02 или 94,1%), по которой проявилось ингибирующее влияние на показатели вариантов опыта с водными вытяжками из листьев, листового опада и почвы прикорневой зоны дуба, при стимулирующем – вяза и особенно клёна (рис. 2). Несмотря на слабый вклад видов-доноров в дисперсию, как показано на второй оси (0,95%) и ординационной диаграмме, прослеживается тенденция: увеличение всхожести семян растений-акцепторов под влиянием водных вытяжек листьев, листового опада и почвы вяза и увеличение длины корней проростков – под влиянием аналогичных водных вытяжек клёна.

Концентрация растворов. Влияние данного фактора на рассматриваемые показатели было ещё слабее (12,6%), но статистически значимо ($F_{(1/70)}=3,28$; $p=0,026$). Векторы концентраций растворов образовали в пространстве двух первых осей RDA арку с минимальной концентрацией в левом верхнем углу и максимальной – в верхнем правом (рис. 3). Данный эффект хорошо известен в многомерном анализе данных как эффект Гуттмана, а в экологии – как эффект арки или подковы («the horseshoe effect»). Чаще всего он является артефактом, указывающим на тренд в данных. В экологии сообществ это обычно смена видового состава в градиенте какого-либо фактора [20]. В данном случае можно отметить, что наблюдается тренд влияния концентраций растворов на показатели растений-акцепторов: наиболее высокие показатели всхожести и длины корней наблюдались при минимальной концентрации водных вытяжек (1:100), тогда как высокая концентрация (1:10) действовала подавляюще.

Местообитание. Вклад данного фактора в общую вариабельность показателей был минимален – 1,95%, и не был статистически

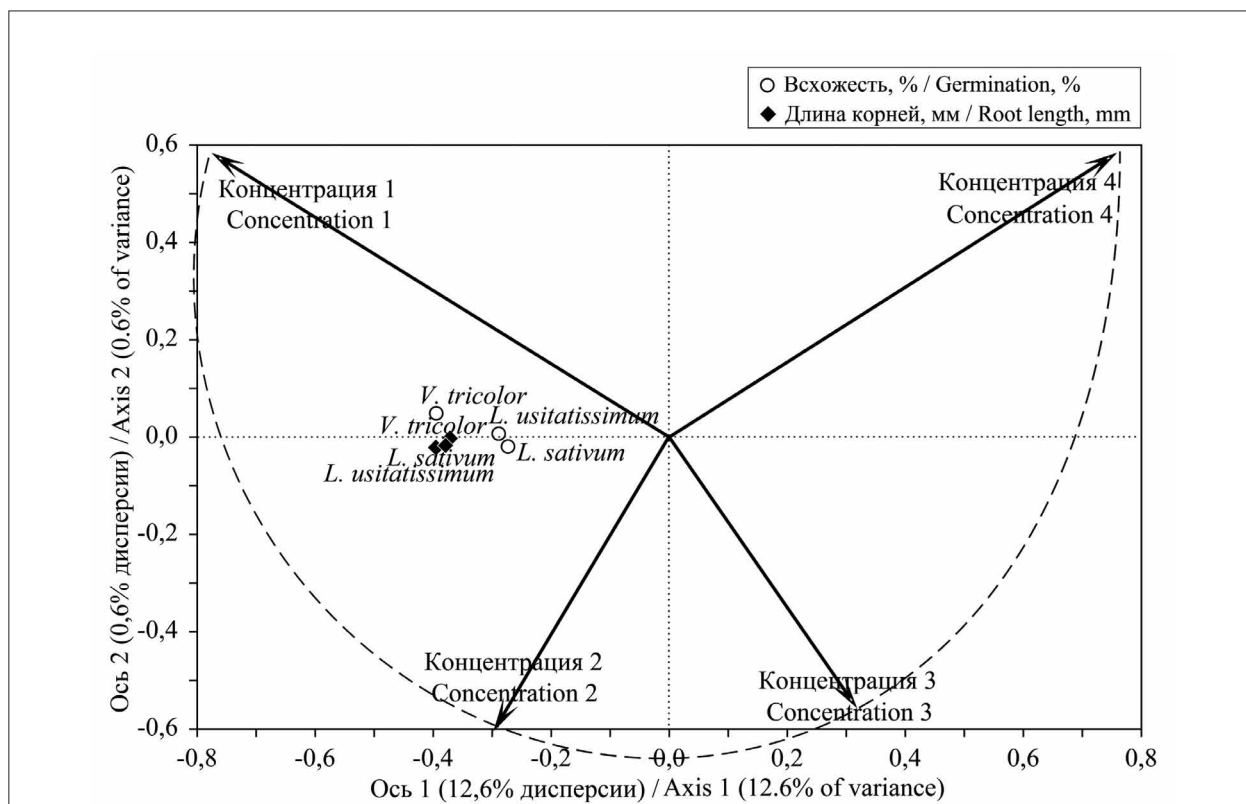


Рис. 3. Всхожесть и длина корня растений-акцепторов в пространстве концентраций водных растворов анализа избыточности (концентрации 1, 2, 3 и 4 равны 1:100, 1:50, 1:25 и 1:10 соответственно). Пунктир – «эффект арки» / **Fig. 3.** Germination and root length of acceptor plants in the space of Solution concentration of redundancy analysis (concentrations 1, 2, 3 and 4 are 1:100, 1:50, 1:25 and 1:10 respectively). Dashed line – “The arch effect”

Таблица 2 / Table 2

Иерархия влияния факторов на характеристики растений-акцепторов
Hierarchy of factors' effect on the characteristics of acceptor plants

Регрессор Regressor	Объяснённая дисперсия, % Variance explained, %	Оценка значимости Test of significance
Агенты переноса Transfer agents	35,4	$F_{(2/69)}=18,91$ $p<0,001$
Растения-доноры Donor plants	16,0	$F_{(2/69)}=6,58$ $p<0,001$
Концентрация раствора Solution concentration	12,6	$F_{(1/70)}=3,28$ $p=0,026$
Местообитание Locality	1,95	$F_{(1/70)}=1,39$ $p=0,24$
Всего / Total	66,01	$F_{(6/65)}=19,35$ $p<0,001$

значим: $F_{(1/70)}=1,39$; $p=0,24$. Поскольку в исследовании было только 2 типа местообитаний, для данного регрессора возможна только одна ось, и результаты нельзя представить на классической ординационной диаграмме, как было сделано для других рассмотренных факторов. Однако можно рассмотреть проекции переменных на эту ось, где отрицательные значения показателей будут соответствовать увеличению показателей всхожести и длины корня в естественных местообитаниях, а положительные – в искусственных. Максимальные нагрузки на ось RDA отразили длина корня и всхожесть кресс-салата (соответственно 0,382 и 0,336), меньшие – льна (0,130 и 0,316) и самые малые – фиалки (соответственно 0,121 и 0,112). Таким образом, все 6 показателей проявили только положительные нагрузки, что по критерию знаков соответствует вероятности отсутствия различий выявленных показателей между естественными и искусственными местообитаниями ($p=0,031$). Это можно увидеть и по усреднённым по всем прочим факторам значениям показателей, которые для 6 признаков всегда были больше в искусственных местообитаниях. В целом, роль данного фактора следует трактовать как слабую, пусть и неслучайную, тенденцию к росту значений всхожести и длины корня в искусственных местообитаниях, чуть более выраженную для кресс-салата.

Информация о вкладе всех 4 факторов в изменчивость показателей растений-акцепторов сведена в таблице 2.

Очевидно, что влияние агентов переноса на всхожесть и длину корней изученных растений в 2,2 раза превосходило влияние видовой принадлежности растений-доноров и в 2,8 раз – влияние всех ранее приведённых

концентраций водных растворов листьев, листового опада и почвы. Вклад местообитания был минимален и статистически незначим в рандомизационном дисперсионном анализе. В целом, все рассмотренные факторы вместе обусловили 2/3 общей дисперсии – 66,01%. Оставшуюся изменчивость с учётом дизайна проведённого эксперимента следует интерпретировать как взаимодействие изученных факторов.

Проведённый анализ аллелопатических эффектов *Q. robur*, *A. platanoides* и *U. glabra* с помощью многомерного метода доказал статистическую значимость и показал вклад каждого регрессора в дисперсию.

Выводы

1. Впервые установлена иерархия регрессоров по вкладу в дисперсию показателей, определяющих аллелопатическую активность видов-доноров *Q. robur*, *A. platanoides*, *U. glabra*.

2. Воздействие агентов переноса (листья, опад и почва прикорневой зоны) является статистически значимым ($F_{(2/69)}=18,91$; $p<0,001$) и демонстрирует вклад в дисперсию показателей всхожести и длины корня растений-акцепторов на 35,4%. Это объясняется наличием аллелохимикатов различных групп в агентах переноса.

3. Регрессор вид-донор определяет меньшую вариабельность показателей всхожести и длины корня растений-акцепторов (16,0%) при статистической значимости ($F_{(2/69)}=6,58$; $p<0,001$). Наивысшим угнетающим действием на всхожесть семян и длину корней проростков биотестов отличается *Q. robur*. Самый низкий ингибирующий эффект на растения-

акцепторы выявлен под воздействием водных вытяжек листьев, листового опада и почвы *U. glabra*. Неоднозначное воздействие на *L. sativum*, *L. usitatissimum* и *V. tricolor* демонстрируют экстракты *A. platanoides*, наряду со стимулирующим действием на длину корней проростков тормозят всхожесть семян.

4. Многомерный анализ подтвердил статистически значимую обратную зависимость между концентрацией водных вытяжек из листьев, листового опада и почвы всех видов-доноров и ингибирующим эффектом на прорастание семян используемых биотестов.

5. Минимальный вклад в дисперсию выявлен у регрессора – тип местообитания. В градиенте между естественными и искусственными сообществами вклад в вариацию составляет 1,95% и не является статистически значимым. Это можно объяснить сходным воздействием «фитогенного поля» доноров в природных и искусственных сообществах, ценопопуляции которых приурочены либо к границе своего естественного ареала, либо выходят за его пределы, где в условиях конкуренции снижается аллелопатическая активность.

6. Представленное исследование показало целесообразность использования многомерного статистического анализа – применение анализа избыточности для сравнения аллелопатического влияния, отличающегося сложной природой и объективной трудностью обобщения показателей его воздействия.

Литература

1. Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление: избр. тр. Киев: Наукова думка, 1991. 432 с.
2. Цандекова О.Л. Роль аллелопатического влияния *Acer negundo* L. на рост травянистых растений // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2020. № 1. С. 15–18. doi: 10.36906/2311-4444/20-1/03
3. Veselkin D.V., Rafikova O.S. Effects of water extracts from the leaves of boxelder maple *Acer negundo* and native tree species on the early development of plants // Russ. J. Ecol. 2022. V. 53. P. 59–67. doi: 10.1134/S1067413622020084
4. Александров Д.С., Калашников Д.В. Влияние экстрактов листового опада клёна остролистного и клёна ясенелистного на прорастание семян и начальные этапы роста газонных трав и декоративных однолетников // Вестник ландшафтной архитектуры. 2019. № 19. С. 3–6.
5. Райс Э.Л. Аллелопатия. М.: Мир, 1978. 182 с.
6. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1998. 853 p.
7. Ашихмина Т.Я., Товстик Е.В., Адамович Т.А. Экологические факторы, определяющие естественную

и антропогенную инвазию борщевика Сосновского *Hieracium sosnowskyi* Manden., меры борьбы с ним (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 20–31. doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-020-031

8. Матвеев Н.М. Аллелопатия как фактор экологической среды. Самара: Самар. кн. изд-во, 1994. 206 с.

9. Кузьмин П.А., Бухарина И.Л. Биохимический состав листьев клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) в урбаносреде // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2020. № 1. С. 48–53. doi: 10.17072/1994-9952-2020-1-48-53

10. Callaway R.M., Ridenour W.M. Novel weapons: invasive success and the evolution of increased competitive ability // Front. Ecol. Environ. 2004. V. 2. No. 8. P. 436–443. doi: 10.1890/1540-9295(2004)002[0436:NW-ISAT]2.0.CO;2

11. Li Z.H., Wang Q., Ruan X., Pan C.D., Jiang D.A. Phenolics and plant allelopathy // Molecules. 2010. V. 15. No. 2. P. 8933–8952. doi: 10.3390/molecules15128933

12. Кондратьев М.Н., Ларикина Ю.С., Дёмина О.С., Скороходова А.Н. Роль экссудатов семян и корней во взаимодействиях между растениями разных видов в ценозе // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2020. № 2. С. 40–53. doi: 10.26897/0021-342X-2020-2-40-53

13. Германец И.А., Левченко П.В., Мальцева Т.А. Биоморфологический подход к изучению аллелопатического воздействия *Quercus robur* L., *Acer platanoides* L., *Ulmus glabra* Huds. // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. 2021. № 2 (38). С. 15–26. doi: 10.32516/2303-9922.2021.38.2

14. Шитиков В.К., Мاستицкий С.Э. Классификация, регрессия, алгоритмы Data Mining с использованием R. Тольятти: Creative Commons, 2017. 351 с.

15. Jolliffe I.T. Principal Component analysis. New York, NY: Springer-Verlag, 2002. 486 p.

16. Oksanen J., Blanchet F.G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlenn D., Minchin P.R., O'Hara R.B., Simpson G.L., Solymos P., Stevens M.H.H., Szoecs E., Wagner H. Package 'vegan'. Community Ecology Package Version 2.6-4 [Электронный ресурс] <https://github.com/vegandevs/vegan> (Дата обращения: 18.12.2023).

17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Austria, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016 [Электронный ресурс] <https://www.R-project.org> (Дата обращения: 18.12.2023).

18. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. Л.: Судостроение, 1980. 384 с.

19. Palmer M.W. Ordination methods – an overview [Электронный ресурс] <http://ordination.okstate.edu/overview> (Дата обращения: 18.12.2023).

20. Podani J., Miklós I. Resemblance coefficients and the horseshoe effect in principal coordinates analysis // Ecology. 2002. V. 83. No. 12. P. 3331–3343. doi: 10.2307/3072083

References

1. Grodzinsky A.M. Allelopathy of plants and soil fatigue: Selected Works. Kiev: Naukova Dumka, 1991. 432 p. (in Russian).
2. Tsandekova O.L. The role of allelopathic influence of *Aegle negundo* L. on the growth of herbaceous plants // Bulletin of Nizhnevartovsk State University. 2020. No. 1. P. 15–18 (in Russian). doi:10.36906/2314-4444/20-1/03
3. Veselkin D.V., Rafikova O.S. Effects of water extracts from the leaves of boxelder maple *Acer negundo* and native tree species on the early development of plants // Russ. J. Ecol. 2022. V. 53. P. 59–67. doi: 10.1134/S1067413622020084
4. Aleksandrov D.S., Kalashnikov D.V. Effect of extracts of leaf fall of the sharp-leaved maple and ash-leaved maple on seed germination and initial stages of growth of lawn grasses and ornamental annuals // Vestnik landshaftnoy arkhitektury. 2019. No. 19. P. 3–6 (in Russian).
5. Rice E.L. Allelopathy. Moskva: Mir, 1978. 182 p. (in Russian).
6. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1998. 853 p.
7. Ashikhmina T.Ya., Tovstik E.V., Adamovich T.A. Ecological factors determining natural and anthropogenic invasion of *Heracleum sosnowskyi* Manden., measures to combat it (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 2. P. 20–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-020-031
8. Matveev N.M. Allelopathy as a factor of ecological environment. Samara: Samara Book Publishing House, 1994. 206 p. (in Russian).
9. Kuzmin P.A., Bukharina I.L. The biochemical composition of the leaves of agricultural maple (*Acer platanoides* L.) in the urban environment // Vestnik Permskogo Universiteta. Biology. 2020. No. 1. P. 48–53 (in Russian). doi: 10.17072/1994-9952-2020-1-48-53
10. Callaway R., Ridenour W. Novel weapons: invasive success and the evolution of increased competitive ability // Front. Ecol. Environ. 2004. V. 2. No. 8. P. 436–443. doi: 10.1890/1540-9295(2004)002[0436:NW-ISAT]2.0.CO;2
11. Li Z.H., Wang Q., Ruan X., Pan C.D., Jiang D.A. Phenolics and plant allelopathy // Molecules. 2010. V. 15. No. 2. P. 8933–8952. doi: 10.3390/molecules15128933
12. Kondratiev M.N., Larikova Y.S., Demina O.S., Skorokhodova A.N. Exudates of seeds and roots as a cenosis interaction means of different plants species // Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2020. No. 2. P. 40–53 (in Russian). doi: 10.26897/0021-342X-2020-2-40-53
13. Getmanets I.A., Levchenko P.V., Maltseva T.A. Biomorphological approach to the study of allelopathic effects of *Quercus robur* L., *Acer platanoides* L., *Ulmus glabra* Huds. // Bulletin of the Orenburg State Pedagogical University. 2021. No. 2 (38). P. 15–26 (in Russian). doi: 10.32516/2303-9922.2021.38.2
14. Shitikov V.K., Mastitskiy S.E. Classification, regression, Data Mining algorithms using R. Tolyatti: Creative Commons, 2017. 351 p. (in Russian)
15. Jolliffe I.T. Principal Component analysis. New York, NY: Springer-Verlag, 2002. 486 p.
16. Oksanen J., Blanchet F.G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlinn D., Minchin P.R., O'Hara R.B., Simpson G.L., Solymos P., Stevens M.H.H., Szoecs E., Wagner H. Package 'vegan'. Community Ecology Package Version 2.6-4 [Internet resource] <https://github.com/vegandevs/vegan> (Accessed: 18.12.2023).
17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Austria, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016 [Internet resource] <https://www.R-project.org> (Accessed: 18.12.2023).
18. Montgomery D.K. Experiment panning and data analysis. Leningrad: Sudostroenie, 1980. 384 p. (in Russian).
19. Palmer M.W. Ordination methods – an overview [Internet resource] <http://ordination.okstate.edu/overview> (Accessed: 18.12.2023).
20. Podani J., Miklós I. Resemblance coefficients and the horseshoe effect in principal coordinates analysis // Ecology. 2002. V. 83. No. 12. P. 3331–3343. doi: 10.2307/3072083