УДК 574.474/552:504.73./581.524.1 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-94-104

ДИНАМИКА АЛЛЕЛОПАТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПОЧВЫ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ С МОНОДОМИНАНТНЫМ ДРЕВОСТОЕМ ПОСЛЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

В.Г. Щербина

Филиал Института природно-технических систем,
РФ, г. Сочи, Курортный проспект, 99/18
E-mail: v.g.scherbina@bk.ru

Проведена оценка динамики аллелопатических эффектов почвы на протяжении семи месяцев вегетационного сезона после моделирования разовой рекреационной нагрузки в семи лесных экосистемах влажных субтропиков Сочинского Причерноморья. По показателю аллелопатической активности почвы и индексу относительного аллелопатического эффекта прослежена сезонная динамика стимулирования и ингибирования ростовых процессов биотеста, в зависимости от наличия определенного древесного вида, величины разовой рекреационной нагрузки и времени, прошедшего после антропогенного воздействия. Составлены ряды лесных экосистем по величине устойчивости эдафических условий к рекреационному воздействию и устойчивости к внедрению новых видов под полог древостоя на диапазоне рекреационных нагрузок 1,39–8,33 чел/га.

Ключевые слова: Сочинское Причерноморье, влажные субтропики, лесные экосистемы, монодоминантный древостой, рекреационная нагрузка, почва, аллелопатический эффект, сезонная динамика.

Поступила в редакцию: 24.02.2022.

Введение. Динамика количественных характеристик накопления растительных метаболитов в природной среде широко изучается [1–6]. Выявлена связь с сезонными изменениями микробиальной активности, динамикой подстилки, ветоши, биомассой травянистых форм, с сезонными изменениями температуры, осадков и пр. Однако изменения аллелопатических эффектов в антропогенно–нарушенных, в том числе рекреационных лесах, остается малоизученным. Для Юга России особую рекреационную ценность представляют леса влажных субтропиков, насыщенные древними реликтовыми видами [7], обладающие широким спектром концентраций вторичных метаболитов [8] и высокой рекреационной аттрактивностью и, следовательно, требующие детального изучения для возможности нормирования нагрузок, поддержания видового фонда, стабильности и рекреационной устойчивости экосистем.

Цель данной работы заключалась в оценке динамики аллелопатических эффектов почвы на протяжении вегетации в лесных экосистемах влажных субтропиков Сочинского Причерноморья после моделирования рекреационной нагрузки.

Материалы и методы. Фактический материал собирался на участках склонов юго-западной экспозиции в бассейнах 11 рек (Шепси, Шахе, Киет, Уч-Дере, Псахе, Восточный и Западный Дагомыс, Сочи, Хоста, Большая Хоста, Мзымта), в лесных сообществах с монодоминантным древостоем: *Castanea sativa* Mill., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus pubescens* Willd., *Buxus colchica* Pojark, *Fagus orientalis* Lipsky, *Carpinus betulus* L., *Taxus baccata* L.

Серия полевых экспериментов включала: 1) моделирование рекреационных нагрузок (вытаптывание), 2) отбор почвенных проб через интервалы времени, 3) определение по почвенным пробам объемной массы почвы и динамики аллелопатической активности.

Контролем служили прилегающие участки территории с визуальным отсутствием повреждений высших растений и средней объемной массой (по 5 пробам) верхнего горизонта почвы на учетной площадке $\leq 0{,}9$ г/см^3.

Моделирование нагрузок проводилось в начале апреля 2021 г. по методике «Моделирования шаговой нагрузки» [9],

с параметрами: продолжительность рекреационного сезона 1200 часов [10]; удаленность от ближайших стволов ≥ 2 м; 5 вариантов нагрузки (1,39; 2,78; 4,17; 6,25; 8,33 чел/га) [11]; 3–кратная повторность; объем воды для дождевания по многолетним данным в апреле месяце [12] составлял 1,7 л.

Почвенные пробы (керны) брались универсальным цилиндрическим буром врезного типа (корнерезом) [13] в верхнем горизонте почвы (010 см) методом конверта (5 - кратная повторность).

Для оценки динамики аллелопатической активности почвы первый этап отбора почвенных проб проводился на 2–5 сутки ($\bar{x}$ = 3), второй – на 14–16 сутки ($\bar{x}$ = 15), третий – на 28–32 сутки ($\bar{x}$ = 30), начиная с 80 суток (четвертый этап; с конца июня), пробы брались с шагом 5 суток до конца октября – по 210 сутки.

Всего, сезонная динамика (7 месяцев) в одной экосистеме и в одном варианте нагрузки оценивалась по 450 пробам.

Пробы на объемную массу почвы отбирались в четыре этапа ($\bar{x}$, сутки): 3, 80, 120, 180. Всего, сезонная динамика в одной экосистеме и в одном варианте нагрузки оценивалась по 120 пробам.

Аллелопатическая активность почвы (I_{50}) оценивалась традиционным методом влияния водных вытяжек (1:1,5) на биотест – семян редьки посевной (*Raphanus sativus* L.) [1], при допустимом отклонении в результатах повторности одной аналитической пробы от среднего ±8–9%.

Всего, в одной экосистеме и варианте нагрузки одного этапа было проанализировано по 9000 семян биотеста.

Выраженность аллелопатического действия рассчитывалась по индексу относительного аллелопатического эффекта – I_{RAE} (1): при отрицательном значении I_{RAE} – проявляется ингибирующий эффект, при положительном – стимулирующий [6, 14].

$$I_{\mathrm{RAE}} = \frac{I_{\mathrm{O}} - I_{\mathrm{C}}}{I_{\mathrm{C}}} \times 100, \qquad (1)$$

где I_{O} – проросшие семена на вытяжке; I_{C} – проросшие семена на дождевой воде.

Статистический анализ фактического материала выполнялся с использованием стандартных методов оценки вариационных рядов генеральных совокупностей, включая метод частной корреляции [15].

Полученные результаты. В контрольных условиях (относительно ненарушенных) аллелопатическая активность почвы, варьируя с апреля по октябрь в диапазоне 7,8–71,5% (рис. 1), характеризует существенную зависимость I_{50} от времени вегетации, объясняя около 63% варьирования значений этого параметра применительно ко всем рядам данных (табл. 1).

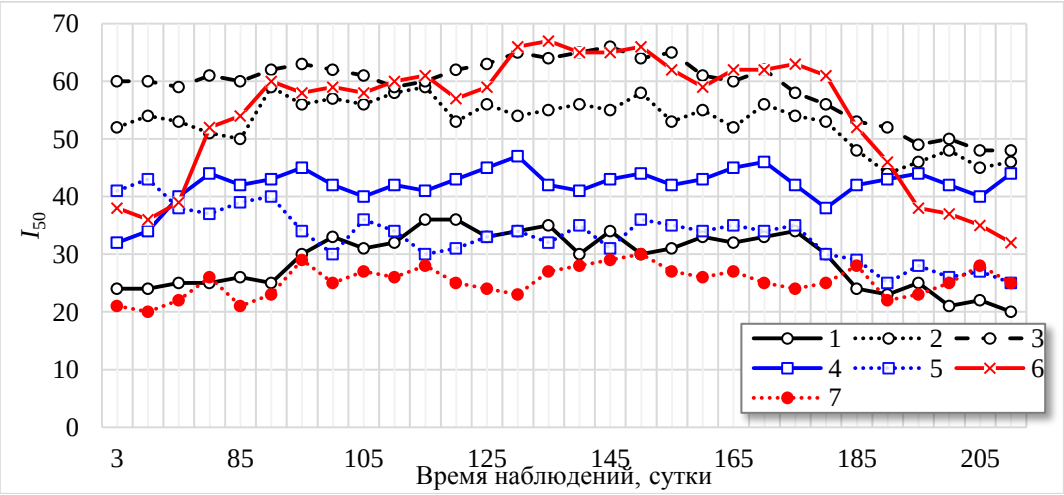


Рис. 1. Временная динамика в контрольных условиях всхожести семян биотеста (I_{50}) при видовом составе древостоя: 1 – *Castanea sativa*, 2 – *Quercus pubescens*, 3 – *Quercus petraea*, 4 – *Buxus colchica*, 5 – *Fagus orientalis*, 6 – *Carpinus caucasica*, 7 – *Taxus baccata*

Fig. 1. Temporal dynamics under control conditions of germination of biotest seeds (I_{50}) with the species composition of the forest stand: 1 – *Castanea sativa*, 2 – *Quercus pubescens*, 3 – *Quercus petraea* 4 – *Buxus colchica*, 5 – *Fagus orientalis*, 6 – *Carpinus caucasica*, 7 – *Taxus baccata*

Таблица 1. Общая характеристика всхожести семян биотеста в контрольных условиях

Древостой (вид)	N	$\bar{x}$	μ_{min}	μ_{max}	σ	R^2
Castanea sativa	450	29,0	20	36	5,95	69,4
Quercus petrea	450	53,1	44	59	4,70	66,1
Quercus pubescens	450	59,3	48	66	4,28	73,5
Buxus colchica	450	42,0	32	47	10,03	49,5
Fagus orientalis	450	33,2	25	43	5,23	63,6
Carpinus caucasica	450	54,3	32	67	48,54	86,1
Taxus baccata	450	25,3	20	30	4,95	34,7

N – число полевых проб; $\bar{x}$ – среднее арифметическое всхожести семян биотеста (I_{50}); μ_{min}, μ_{max} – предельные значения генеральной совокупности; σ – дисперсия; R^2– коэффициент детерминации (%)

Для листопадных древесных видов меньшие величины ингибирования (соответствует I_{50} с большими значениями) отмечаются в летний период, повышаясь к концу сезона вегетации и в межсезонье. Это объясняется увеличением количества осадков, пула органики и смены вымываемых органических кислот и фенольных соединений из опадающих листьев, приводя к стойкому накоплению физиологически активных соединений в верхнем горизонте почвы [2, 5, 6]. Исключения представляют вечнозеленые древесные сообщества с эдификаторной ролью *Buxus colchica* и *Taxus baccata.* Наличие кожистой листвы (хвои) и более равномерная их смена в течении годичной фенологии, обеспечивает растянутую во времени деструкцию опада и подстилки. Большие величины интенсивности экстракции колинов из опавших ассимиляционных пластинок отмечаются в весенний период (зимне–весенний [3]), составляя по коэффициенту вариации увеличение соответственно на 50,8–53,2 и 3,1–5,8% (R^2 = 92,3 и 95,1%).

Большие средние величины всхожести биотеста (I_{50}) в экосистемах с эдификаторами *Quercus petrea* и *Quercus pubescens* ($\bar{x}$ = 53,1–59,3) можно объяснить известным слабым промывным режимом почвы в данных экосистемах и значительным накоплением подстилки [1, 16, 17].

Экосистемы с *Carpinus caucasica* характеризуются также большей влажностью верхнего горизонта почвы и особенностями слоя рыхлого листового опада (скручивание листовых пластинок при подсыхании), способствующие ускорению экстракции колинов (коэффициент вариации возрастает на 80,2%) и полному или почти полному их разрушению к середине лета.

В целом, полученные результаты в контрольных условиях согласуются с почвоулучшающей функцией анализируемых сообществ и отдельными временными этапами влияния стимулирующего действия метаболитов ризосферных организмов на ростовые процессы растительных форм [4, 5, 18–20].

В зоне влажных субтропиков рекреационное уплотнение верхних горизонтов почвы сопровождается изменением физических характеристик почвы и интенсивностью протекающих биохимических процессов [10, 11, 21]. Многими авторами отмечается вариабельность динамики величины токсичности [2, 3, 6], что объясняется ритмом сезонной и суточной активности микрофлоры. Поэтому для общих ценотических оценок предлагается отталкиваться от средних показателей токсичности почвы. Полученные результаты динамики за вегетационный период (рис. 2, табл. 2) подтверждают зависимость величин аллелопатических эффектов от рекреационной нагрузки: чем больше эдафические условия отклоняются от контрольных значений под антропогенным воздействием, тем больше поступает в среду биологически активных веществ.

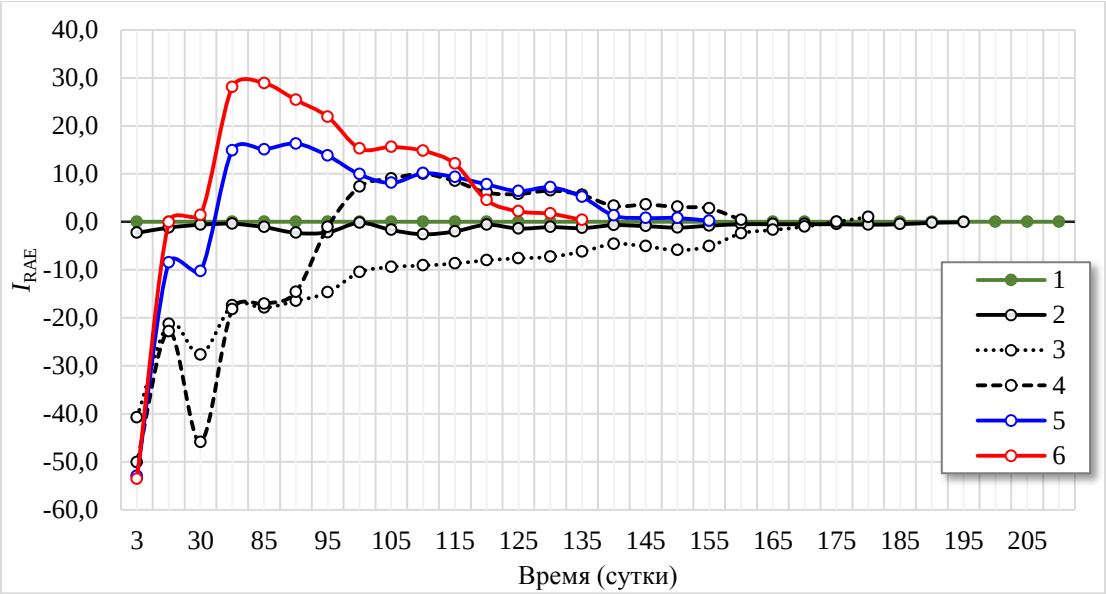


Рис. 2. Динамика I_{RAE} в лесных экосистемах после разовой рекреационной нагрузки (чел/га): 1 – 0,00 (контроль); 2 – 1,39; 3 – 2,78; 4 – 4,17; 5 – 6,25; 6 – 8,33

Fig. 2. Dynamics of I_{RAE} in forest ecosystems after a single recreational load (person/ha): 1 – 0,00 (control); 2 – 1,39; 3 – 2,78; 4 – 4,17; 5 – 6,25; 6 – 8,33

Таблица 2. Средние и предельные значения индекса относительного аллелопатического эффекта (I_{RAE}) на диапазоне 80–210 суток, без учета контроля

Эдификатор (вид)	Рекреационная нагрузка (чел/га)				
	1,39	2,78	4,17	6,25	8,33
Castanea sativa	-1,0 (-3,5 – -0,1)	-6,2 (-15,2 – 0,8)	1,4 (-16,0 – 8,4)	4,0 (1,1 – 7,5)	9,3 (1,6 – 18,5)
Quercus petrea	-1,0 (-5,0 – -0,1)	-6,6 (-10,4 – 0,9)	2,1 (-11,0 – 9,3)	11,0 (1,3 – 28,4)	13,2 (1,2 – 32,1)
Quercus pubescens	-0,7 (-3,3 – -0,1)	-6,8 (-16,3 – 2,9)	0,8 (-18,0 – 8,5)	10,8 (1,1 – 34,5)	26,7 (5,7 – 60,5)
Buxus colchica	-0,6 (-3,5 – -0,1)	-7,1 (-18,0 – 1,5)	2,7 (-20,0 – 15,7)	9,4 (1,1 – 18,0)	18,0 (3,8 – 26,1)
Fagus orientalis	-1,2 (-4,1 – -0,1)	-9,3 (-31,0 – 3,6)	2,0 (-26,0 – 17,0)	11,9 (1,6 – 18,2)	21,4 (4,5 – 31,1)
Carpinus caucasica	-1,5 (-4,0 – -0,2)	-10,4 (-32,4 – 4,0)	2,9 (-13,7 – 12,0)	4,3 (1,3 – 10,6)	15,3 (2,3 – 27,7)
Taxus baccata	-1,1 (-3,2 – -0,1)	-5,9 (-14,0 – 1,1)	-3,1 (-33,0 – 8,8)	14,0 (1,3 – 26,1)	21,0 (8,0 – 29,4)

Резкое увеличение содержание колинов в первые несколько суток после эдафического стресса подтверждается нашими исследованиями I_{RAE}, регистрируя ингибирование прорастания биотеста во всех лесных экосистемах. Фактор аллелопатии, варьируя по индексу I_{RAE} в среднем от -2,3 до -53,6 относительно контрольных условий, имеет прямую связь с величиной моделируемой рекреационной нагрузки, завися от биоэкологических особенностей древесного эдификатора лесной экосистемы. Более значительные ингибирующие аллелопатические эффекты выражены в экосистемах с *Carpinus caucasica* (I_{RAE} = -6,0 – -70,0; $\bar{x}$ = -55,9) и *Fagus orientalis* (I_{RAE} = -73,4 – -5,3; $\bar{x}$ = -57,5).

Уменьшение содержания колинов через 15 суток после начала сезонного эксперимента подтверждается полученной фитотоксичностью почвы, снижающейся в 3,5–4,1 раза с обратной зависимостью от рекреационной нагрузки.

По данным [22] к 30 суткам в вегетативных экспериментах происходит уве-

личение содержания органического углерода (колинов), предположительно, за счет разложения остатков микроорганизмов в ходе сукцессионных смен их сообществ, а также накопления метаболитов микроорганизмами. По нашим данным значения I_{RAE} увеличиваются с усилением ингибирующих свойств, с большими величинами при нагрузке 4,17 чел/га. В сообществах с высокой метаболической активностью при значительном рекреационном воздействии (≥ 6,25 чел/га) количество колинов снижается ниже показателей контрольных условий, приводя к проявлению стимулирующих свойств в экосистемах с *Quercus petrea* (I_{RAE}= 28,4–32,1), *Quercus pubescens* (I_{RAE}= 34,5–60,5), *Carpinus caucasica* (I_{RAE}= 10,6–27,7), *Fagus orientalis* (I_{RAE}= 15,7).

В последующий временной диапазон использование микроорганизмами остатков доступных органических веществ ведет к снижение концентрации колинов до уровня значительно ниже, чем в контрольных условиях, проявляя в течение 5–75 суток положительное воздействие на ростовые процессы биотеста в прямой зависимости от рекреационной нагрузки. На 185 сутки стимулирующие свойства колинов уже не регистрируются. Ингибирующие свойства при 1,39 чел/га отслеживаются по 190–200 сутки.

Можно предположить, что изменения в сезонном содержании колинов, проявляемое в величине ингибирования или стимулирования, связано с чередованием аэробных и анаэробных условий, приводящее к снижению фитотоксичности, со снижением пула органики и, соответственно, временными (сукцессионными) изменениями в качественном и количественном составе микроорганизмов ризосферы [4, 23], а также с промывным режимом почвы [16].

Во всех анализируемых экосистемах после нагрузки происходит самовосстановление аллелопатического режима до контрольных значений I_{RAE} (табл. 3), находясь в обратной тесной связи (94,3–99,7%) с величиной моделируемого рекреационного воздействия. Составляя, в зависимости от древесного вида, диапазон времени самовосстановления от 120–140 суток (при нагрузке 8,33 чел/га) до 187–203 суток (при 1,39 чел/га). Статистические характеристики временных рядов не перекрываются, характеризуя достоверное статистическое отличие между ними при значимости < 0,05 (t = 2,85).

Таблица 3. Время (сутки) восстановления I_{RAE} до контрольных значений

Эдификатор (вид)	Рекреационная нагрузка (чел/га)					R^2
	1,39	2,78	4,17	6,25	8,33	
Castanea sativa	203,3	185,0	161,7	158,3	140,0	96,4
Quercus petrea	193,3	186,7	165,0	143,3	125,0	97,7
Quercus pubescens	196,7	183,3	166,7	146,7	123,3	98,9
Buxus colchica	198,3	181,7	158,3	138,3	121,7	99,7
Fagus orientalis	191,7	180,0	143,3	141,7	118,3	94,3
Carpinus caucasica	186,7	165,0	146,7	140,0	120,0	97,8
Taxus baccata	201,7	188,3	165,0	151,7	131,7	99,3

Представленные на рис. 3 результаты динамики I_{RAE} после рекреационной трансформации почвы, отражают вариацию относительных аллелопатических эффектов в зависимости от видовых особенностей древесного эдификатора экосистем, степени рекреационной нарушенности эдафических условий и временем, прошедшего после нагрузки.

В экосистемах на функциональном диапазоне рекреационного изменения объемной массы почвы (≤ 1,19 г/см^3) водорастворимые колины суммарно за сезон проявляют ингибирующие свойства с высокой полиномиальной зависимостью (R^2 = 0,97–0,99, при p = 0,95). Значительные отличия проявляются на начальном этапе усиления трансформации почвы, т.е. при переходе по средним значениям объемной массы почвы от 0,92 до 1,06 г/см^3, с большей интенсивностью возрастая в экосистемах с *Castanea sativa* (в 13,5 раз). Меньшие изменения регистрируются в сообществах с

Quercus pubescens и *Fagus orientalis* (увеличение в 8,8 раз), *Quercus petraea* и *Carpinus caucasica* (8,3 раза), *Buxus colchica* и *Taxus baccata* (7,1 раза).

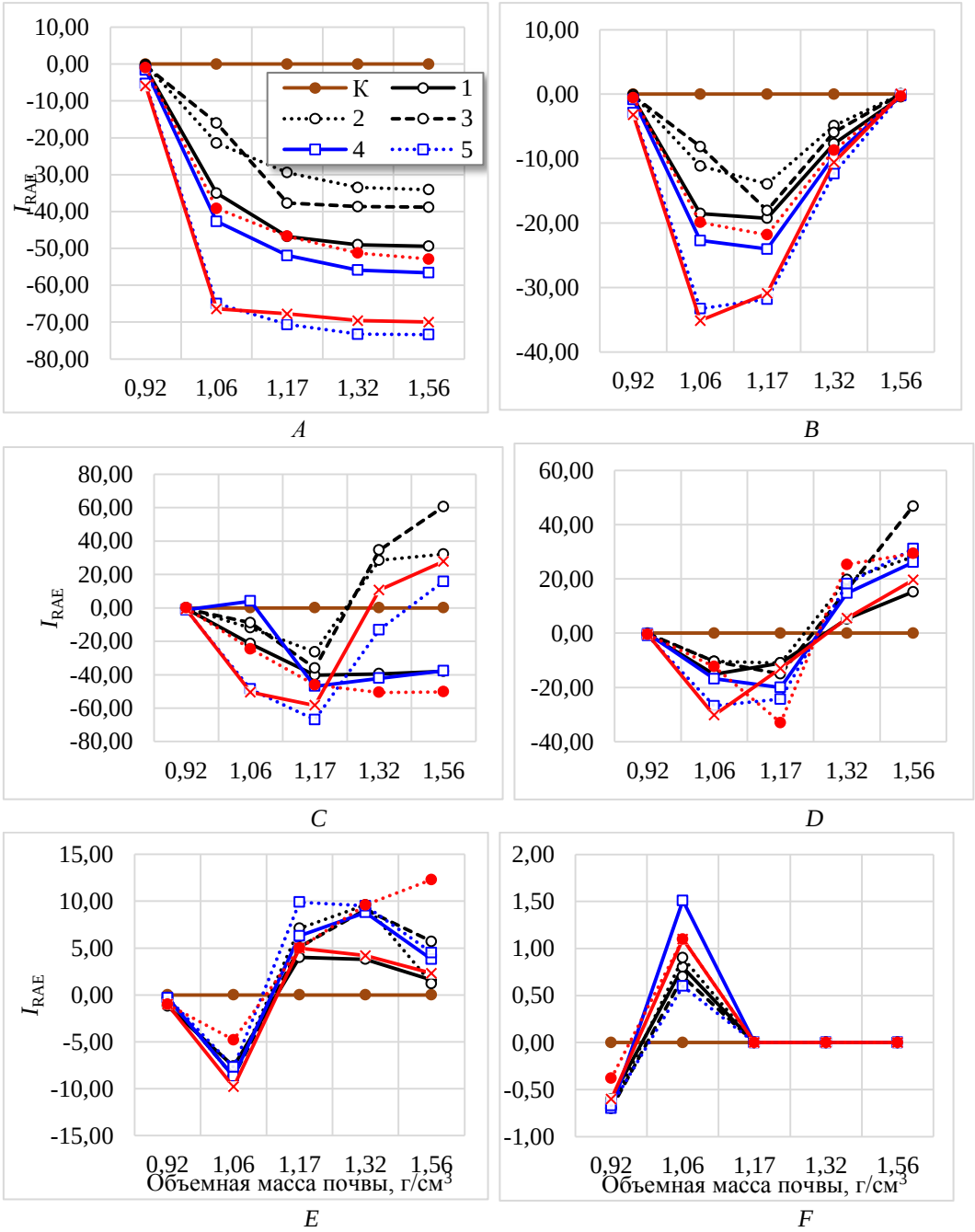


Рис. 3. Соотношение между аллелопатическим эффектом на временном интервале (*A* – 3 суток, *B* – 15 суток, *C* – 30 суток, *D* – 80 суток, *E* – 120 суток, *F* – 180 суток) с плотностью почвы в экосистемах: К – контроль по каждому виду, 1 – *Castanea sativa*, 2 – *Quercus pubescens*, 3 – *Quercus petraea*, 4 – *Buxus colchica*, 5 – *Fagus orientalis*, 6 – *Carpinus caucasica*, 7 – *Taxus baccata*

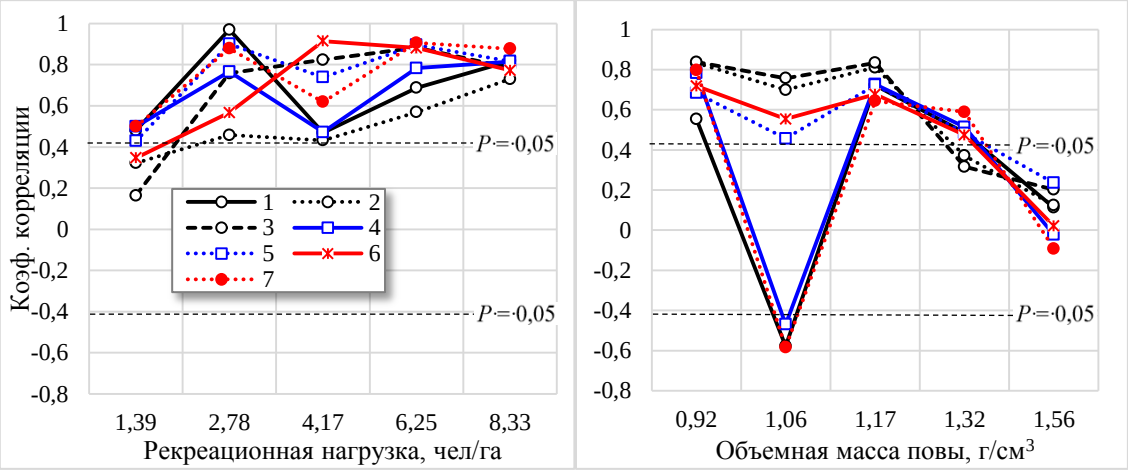
Fig. 3. Correlation between the allelopathic effect on the time interval (*A* – 3 days, *B* – 15 days, *C* – 30 days, *D* – 80 days, *E* – 120 days, *F* – 180 days) with soil density in ecosystems: K – control for each species, 1 – *Castanea sativa*, 2 – *Quercus pubescens*, 3 – *Quercus petraea*, 4 – *Buxus colchica*, 5 – *Fagus orientalis*, 6 – *Carpinus caucasica*, 7 – *Taxus baccata*

В диапазоне пессимальных рекреационных изменений объемной массы почвы (1,20–1,66 г/см^3) в целом проявляется стимулирующее действие колинов. Исключение регистрируется только при 1,20–1,44 г/см^3 ($\bar{x}$ = 1,32 г/см^3) с незначительным ингибированием в экосистемах с эдификатором *Castanea sativa* (–1,1) и *Carpinus caucasica* (–0,5). Большие средние величины характерны для представителей рода *Quercus*: *Quercus petraea* (6,6) и *Quercus pubescens* (4,2). По мере снижения формируется ряд: *Taxus baccata* (3,8), *Fagus orientalis* (3,2), *Carpinus caucasica* и *Buxus colchica* (1,4), *Castanea sativa* (–0,2). Полученный ряд согласуется и дополняет ранние исследования по устойчивости древесных видов в рекреационных условиях [8].

Снижение фитотоксичности при значительном рекреационном уплотнении почвы можно объяснить условиями слабой насыщенности органическими соединениями [17] и большей степенью потери активности тормозителя при большем развитии анаэробных условий [22].

Полученные в исследованиях результаты по видовой специфичности древостоя при проявлении аллелопатии подтверждают исследования в природной среде определяющего влияния вида при модификации аллелопатической среды внешними условиями [1, 3, 4].

Для объективной оценки характера и силы связи между парами переменных «объемная масса почвы» – «аллелопатический эффект» и «рекреационная нагрузка» – «аллелопатический эффект», применялся частный коэффициент корреляции, с нивелированием эффекта временных вариаций в ходе сезонной динамики (рис 4).



A *B*

Рис. 4. Корреляционная связь аллелопатических эффектов с рекреационной нагрузкой (*A*) и объемной массой почвы (*B*) в экосистемах: 1 – *Castanea sativa*, 2 – *Quercus pubescens*, 3 – *Quercus petraea*, 4 – *Buxus colchica*, 5 – *Fagus orientalis*, 6 – *Carpinus caucasica*, 7 – *Taxus baccata*

Fig. 3. Correlation of allelopathic effects with recreational load (*A*) and bulk soil mass (*B*) in ecosystems: 1 – *Castanea sativa*, 2 – *Quercus pubescens*, 3 – *Quercus petraea*, 4 – *Buxus colchica*, 5 – *Fagus orientalis*, 6 – *Carpinus caucasica*, 7 – *Taxus baccata*

Полученные коэффициенты, при числе степеней свободы *df* (*n* – 2) = 18 и табличном уровне значимости $r_{\text{табл } 0,05}$ = 0,42, $r_{\text{табл } 0,01}$ = 0,54, характеризуют наличие тесной связи аллелопатических эффектов с объемной массой почвы на диапазоне плотности 0,86–1,19 г/см^3. Подтверждая превалирование аэробных условий в диапазоне допустимого рекреационного воздействия, а также указывая на незначительное отклонение от нормы восстановленных соединений и аминокислот в зоне ризосферы [1].

Более тесная достоверная связь регистрируется между аллелопатией и рекреационной нагрузкой, подтверждая ранее полученные результаты [21].

Заключение. Анализируемые лесные экосистемы в течение вегетационного сезона отличаются вариацией аллелопатического режима, связанного с биоэкологическими свойствами сообщества, определяемые видовой принадлежностью древесного эдификатора. По величине аллелопатической активности формируются ряды экосистем по степени снижения: *Quercus pubescens* > *Carpinus caucasica* > *Quercus petrea* > *Buxus colchica* > *Fagus orientalis* > *Castanea sativa* > *Taxus baccata*.

В рекреационных экосистемах с монодоминантным древостоем, в зависимости от наличия определенного древесного эдификатора (растения-акцептора), величины разовой рекреационной нагрузки и времени, прошедшего после антропогенного воздействия, аллелопатические эффекты свободного органического вещества (колинов) в эдафической среде взаимодействия растений могут проявлять, как стимулирование, так и ингибирование ростовых процессов.

Время восстановления аллелопатического режима, имея тесную сопряженность с рекреационной нагрузкой, может характеризовать величину устойчивости эдафической составляющей лесных экосистем к рекреационному воздействию, формируя ряд: *Castanea sativa* > *Taxus baccata* > *Buxus colchica* > *Quercus pubescens* > *Quercus petrea* > *Fagus orientalis* > *Carpinus caucasica.*

Величина и направление аллелопатических эффектов может отражать устойчивость экосистем после разовой рекреационной нагрузки к внедрению новых видов под полог древостоя. После нагрузки 1,39 чел/га устойчивость сохраняется выше контрольных значений во всех экосистемах на протяжении анализируемых 210 суток. С увеличением нагрузки формируются ряды:

2,78 чел/га – *Carpinus caucasica* > *Fagus orientalis* > *Taxus baccata* > *Castanea sativa* > *Quercus petrea* > *Buxus colchica* > *Quercus pubescens;*

4,17 чел/га – *Fagus orientalis* > *Carpinus caucasica* > *Taxus baccata* > *Buxus colchica* > *Castanea sativa* > *Quercus pubescens* > *Quercus petrea;*

6,25 чел/га – *Castanea sativa* > *Buxus colchica* > *Taxus baccata* > *Fagus orientalis* > *Carpinus caucasica* > *Quercus petrea* > *Quercus pubescens*;

8,33 чел/га – *Quercus pubescens* > *Castanea sativa* > *Buxus colchica* > *Taxus baccata* > *Quercus petrea* > *Fagus orientalis* > *Carpinus caucasica*.

Полученные результаты необходимы для накопления теоретической базы по участию аллелопатии в эндогенном механизме устойчивости трансформированных биологических сообществ и протекающих восстановительных процессов в лесных экосистемах после снятия рекреационной нагрузки, что, в прикладном аспекте, необходимо учитывать при планировании или реконструкции рекреационных зон, разработке эффективных стратегий контроля за вторжениями новых видов в лесные сообщества.

Работа выполнена в рамках гос. задания по теме № АААА–А16–116012510144–6 «Совершенствование механизма управления природопользованием с целью обеспечения эколого–экономической безопасности функционирования индустрии туризма».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гродзинский А.М.* Аллелопатия в жизни растений и их сообществ. Киев: Наукова думка, 1965. 198 с.

2. *Головко Е.А., Биляновская Т.М., Воробей И.И.* Аллелопатия культурних растений в аспекте проблем агрофитоценологии // Физиология и биохимия культурних растений. 1999. Т. 31. № 2. С.103–113.

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

4. *Иванов В.П.* Растительные выделения и их значение в жизни фитоценозов. М.: Наука, 1973. 294 с.

5. *Юрчак Л.Д.* Алелопатія в агробіоценозах ароматичних рослин. К.: Фітосоціоцентр, 2005. 411с.

6. *Biotic* interactions in a Mediterranean oak forest: role of allelopathy along phenological development of woody species / H. Hashoum, M. Santonja, T. Gauquelin et al. // European Journal of Forest Research. 2017. № 136, P. 699–710. DOI: 10.1007/s10342-017-1066-z.

7. *Литвинская С.А., Лозовой С.П.* Памятники природы Краснодарского края. Краснодар: Периодика Кубани, 2005. 352 с.

8. *Щербина В.Г.* Аллелопатическая напряженность биотопов в лесных экосистемах влажных субтропиков // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 1 (43). С. 95–106. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-95-106.

9. *Временная методика* определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временные нормы этих нагрузок. М.: ЦБНТИ лесхоза, 1987. 34 с.

10. *Ивонин В.М.* Рекреология. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. 240 с.

11. *Ивонин В.М., Авдонин В.Е., Пеньковский Н.Д.* Рекреационная экология горных лесов российского Причерноморья. Краснодар: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 271 с.

12. *Количество осадков* и дождливых дней. Климат Сочи. Режим доступа URL:https://pogoda33.ru/Сочи (дата обращения: 27.02.2021).

13. *Инструмент* для извлечения тонких корней деревьев, растений / С.В. Закамский, В.А. Закамский; опубл. 23.03.2013; Патент № A01B1A01G23.

14. *Phenolics* of the understory shrub Cotinus coggygria influence Mediterranean oak forests diversity and dynamics / J. Gavinet, M. Santonja, V. Baldy et al. // Forest Ecology and Management. 2019. №. 441. P. 262270

DOI: 10.1016/j.foreco.2019.03.049.

15. *Рокицкий П.Ф.* Биологическая статистика. Минск: Высшая школа, 1964. 328 с.

16. *Федотов Г.Н., Горепекин И.В., Позднякова А.Д.* Взаимосвязь предыстории использования и химических свойств почв с их аллелотоксичностью // Почвоведение. 2020. № 3. С. 379–386. DOI: 10.31857/S0032180X2003003X.

17. *Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головко Э.Я.* Аллелопатическое почвоутомление. К: Наукова думка, 1979. 248 с.

18. *Булыгин Н.Е.* Древесные растения местной флоры в урбанофитоценозах Санкт-Петербурга // Бюл. ГБС. 1995. Вып. 172. С. 37.

19. *Головко Э.А., Горобец С.А., Яхно В.С.* Роль микроорганизмов в субстратоутомлении // Роль токсинов растительного происхождения в аллелопатии. Киев: Наукова думка, 1983. С. 1029.

20. *Чайлахян М.Х.* Метаболиты микробов как стимуляторы роста и развития высших растений // Применение антибиотиков в растениеводстве. Ереван, 1962. С. 113–121.

21. *Щербина В.Г.* Влияние рекреационного воздействия в лесных сообществах на аллелопатический режим древесных эдификаторов // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 102–110. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-102-110.

22. *Гродзинский А.М., Головко Е.А., Горобец С.А.* Экспериментальная аллелопатия Киев: Наукова думка, 1975. 230 с.

23. *Souto C., Chiapusio G., Pellissier F.* Relationships between phenolics and soil microorganisms in spruce forests: significance for natural regeneration // Journal of Chemical Ecology. 2000. №. 26. P. 2025-2034. DOI: 10.1023/A:1005504029243.

DYNAMICS OF ALLELOPATIC SOIL EFFECTS IN FOREST ECO-SYSTEMS WITH A MONODOMINANT FOREST STAND AFTER SIMULATION OF RECREATIONAL LOAD

V.G. Scherbina

Branch of Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sochi, Kurortny Av., 99/18

The dynamics of allelopathic effects of the soil was assessed within seven months of the growing season after simulating a one-time recreational load in seven forest ecosystems of the humid subtropics of the Sochi Black Sea region. Using the index of allelopathic activity of the soil and the index of the relative allelopathic effect, the seasonal dynamics of stimulation and inhibition of the growth processes of the biotest was traced, depending on the presence of a certain tree species, the magnitude of a one-time recreational load and the time elapsed since anthropogenic impact. The rows of forest ecosystems were compiled in terms of the resistance of edaphic conditions to recreational impact and the resistance to the introduction of new species under the canopy of the forest stand in the range of recreational loads of 1.39–8.33 people/ha.
Keywords: Sochi Black Sea region, humid subtropics, forest ecosystems, monodominant forest stand, recreational load, soil, allelopathic effect, seasonal dynamics.

REFERENCES

1. *Grodzinskij A.M.* Allelopatija v zhizni rastenij i ih soobshhestv (Allelopathy in the life of plants and their communities), Kyiv: Naukova dumka, 1965, 198 p.

2. *Golovko E.A., Biljanovskaja T.M., and Vorobej I.I.* Allelopatija kul'turnih rastenij v aspekte problem agrofitocenologii (Allelopathy of Cultivated Plants in the Aspect of Problems of Agrophytocenology). *Fiziologija i biohimija kul'turnih rastenij*, 1999. Vol. 31, No. 2, pp. 103–113.

3. *Matveev N.M.* Allelopatija kak faktor jekologicheskoj sredy (Allelopathy as a factor of the ecological environment), Samara: Samar. kn. izd-vo, 1994, 206 p.

4. *Ivanov V.P.* Rastitel'nye vydelenija i ih znachenie v zhizni fitocenozov (Plant secretions and their importance in the life of phytocenoses), Moscow: Nauka, 1973, 294 p.

5. *Jurchak L.D.* Alelopatija v agrobiocenozah aromatichnih roslin (Alelopathy in agrobiocenoses of aromatic roslins), Kyiv: Fitosociocentr, 2005, 411 p.

6. *Hashoum H., Santonja M., Gauquelin T., Saatkamp A., Gavinet J., Greff S., Lecareux C., Fernandez C., and Bousquet-Mélou A.* Biotic interactions in a Mediterranean oak forest: role of allelopathy along phenological development of woody species. *European Journal of Forest Research*, 2017, Vol. 136, pp. 699–710. DOI: 10.1007/s10342-017-1066-z.

7. *Litvinskaya S.A.* and *Lozovoi S.P.* Pamjatniki prirody Krasnodarskogo kraja (Natural monuments of the Krasnodar Territory), Krasnodar: Periodika Kubani, 2005, 352 p.

8. *Shherbina V.G.* Allelopaticheskaja naprjazhennost' biotopov v lesnyh jekosistemah vlazhnyh subtropikov (Allelopathic intensity of biotopes in forest ecosystems of humid subtropics). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2021, No. 1 (43), pp. 95–106. Doi: 10.33075/2220-5861-2021-1-95-106.

9. Vremennaja metodika opredelenija rekreacionnyh nagruzok na prirodnye kompleksy pri organizacii turizma, jekskursij, massovogo povsednevnogo otdyha i vremennye normy jetih nagruzok (Temporary methodology for determining recreational loads on natural complexes in the organization of tourism, excursions, mass daily recreation and temporary norms of these loads), Moscow: CBNTIleshoza, 1987, 34 p.

10. *Ivonin V.M.* Rekreologija (Recreology), Rostov-on-Don: Izd-vo JuFU, 2008, 240 p.

11. *Ivonin V.M., Avdonin V.E., and Pen'kovskij N.D.* Rekreacionnaja jekologija gornyh lesov rossijskogo Prichernomor'ja (Recreational ecology of mountain forests of the Russian Black Sea region), Krasnodar: Izd-vo SKNC VSh, 2000, 271 p.

12. Kolichestvo osadkov i dozhdlivyh dnej. Klimat Sochi (The amount of precipitation and rainy days. Climate of Sochi), available at: https://pogoda33.ru/Sochi (March 03, 2021).

13. *Zakamskij S.V. and Zakamskij V.A.* Instrument dlja izvlechenija tonkih kornej derev'ev, rastenij (Tool for extracting thin roots of trees, plants). Patent, No. A01B1A01G23, 23.03.2013.

14. *Gavinet J., Santonja M., Baldy V., Hashoum H., Peano S., Tchong T., Gros R., Greff S., Fernandez C., and Bousquet-Mélou A.* Phenolics of the understory shrub Cotinus coggygria influence Mediterranean oak forests diversity and dynamics. *Forest Ecology and Management*, 2019, Vol. 441, pp. 262270 DOI: 10.1016/j.foreco.2019.03.049.

15. *Rokickij P.F.* Biologicheskaja statistika (Biological statistics), Minsk: Vysshaja shkola, 1964, 328 p.

16. *Fedotov G.N., Gorepekin I.V., and Pozdnjakova A.D*. Vzaimosvjaz' predystorii ispol'zovanija i himicheskih svojstv pochv s ih allelotoksichnost'ju (Relationship between the prehistory of use and the chemical properties of soils with their allelotoxicity), *Pochvovedenie*, 2020, No. 3, pp. 379–386. DOI:10.31857/S0032180X2003003X

17. *Grodzinskij A.M., Bogdan G.P., and Golovko Je.Ja.* Allelopaticheskoe pochvoutomlenie (Allelopathic soil fatigue), Kyiv: Naukova dumka, 1979, 248 p.

18. *Bulygin N.E.* Drevesnye rastenija mestnoj flory v urbanofitocenozah Sankt- Peterburga (Woody plants of local flora in urban phytocenoses of St. Petersburg). *GBS Bulletin*, 1995, Vol. 172, pp. 37.

19. *Golovko Je.A., Gorobec S.A., and Jahno V.S.* Rol' mikroorganizmov v substratoutomlenii (The role of microorganisms in substrate fatigue). *Rol' toksinov rastitel'nogo proishozhdenija v allelopatii*, Kiev: Naukova dumka, 1983, pp. 1029.

20. *Chajlahjan M.H.* Metabolity mikrobov kak stimuljatory rosta i razvitija vysshih rastenij (Metabolites of microbes as stimulators of growth and development of higher plants) // *Primenenie antibiotikov v rastenievodstve*. Erevan, 1962, pp. 113–121.

21. *Shherbina V.G.* Vlijanie rekreacionnogo vozdejstvija v lesnyh soobshhestvah na allelopaticheskij rezhim drevesnyh jedifikatorov (Influence of recreational impact in forest communities on the allelopathic regime of tree edificators). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2021, No. 4 (46), pp. 102–110. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-102-110.

22. *Grodzinskij A.M., Golovko E.A., and Gorobec S.A.* Jeksperimental'naja allelopatija (Experimental allelopathy). Kiev: Naukova dumka, 1975. 230 p.

23. *Souto C., Chiapusio G., and Pellissier F.* Relationships between phenolics and soil microorganisms in spruce forests: significance for natural regeneration. *Journal of Chemical Ecology*, 2000, Vol. 26, pp. 2025-2034. DOI: 10.1023/A:1005504029243.