

Научная статья
УДК 581.524.1/552:504.73
doi: 10.18522/1026-2237-2022-1-96-106

АЛЛЕЛОПАТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПОЧВЫ ПОСЛЕ РАЗОВОЙ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ СОЧИНСКОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ

Виталий Георгиевич Щербина

Филиал Института природно-технических систем в г. Сочи, Сочи, Краснодарский край, Россия
v.g.scherbina@bk.ru

Аннотация. Исследован аллелопатический режим почвы через сутки и 30 сут после моделируемого рекреационного воздействия в семи лесных экосистемах Сочинского Причерноморья с монодоминантным древостоем методом тестирования водных почвенных вытяжек. Определено, что разовые рекреационные нагрузки в анализируемых экосистемах сопровождаются ростом аллелопатической активности почвы. Заметное усиление фитотоксичности (16–66 %) регистрируется при нагрузке 2,78–4,17 чел/га. Больше рекреационное воздействие (6,25–8,33 чел/га) приводит к формированию тропиной сети, анаэробным условиям и ингибированию биоты в диапазоне 0,8–1,0. Установлено, что через 30 сут после разового рекреационного воздействия активность почвы восстанавливается до контрольных значений только после нагрузки 1,39 чел/га. После нагрузки 2,78–4,17 чел/га отмечается всего лишь снижение фитотоксичности на 9–21 %. На участках после максимального воздействия (6,25–8,33 чел/га) фитотоксичность снижается ниже контрольных значений в экосистемах с доминированием *Fagus orientalis* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus pubescens* Willd. и *Carpinus betulus* L., косвенно объясняя вероятность внедрения в эти сообщества вдоль троп, чуждых для лесных экосистем видов. Значительная активность почвы сохраняется в экосистемах с *Taxus baccata* L., *Castanea sativa* Mill. и *Vixis colchica* Pojark., объясняя их устойчивость к разовым рекреационным нагрузкам.

Ключевые слова: Сочинское Причерноморье, лесная экосистема, рекреационная нагрузка, плотность почвы, аллелопатическая активность

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А16-116012510144-6 «Совершенствование механизма управления природопользованием с целью обеспечения эколого-экономической безопасности функционирования индустрии туризма».

Для цитирования: Щербина В.Г. Аллелопатический режим почвы после разовой рекреационной нагрузки в лесных экосистемах Сочинского Причерноморья // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. С. 96–106.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

ALLELOPATHIC SOIL REGIME AFTER A ONE-TIME RECREATIONAL LOAD IN THE FOREST ECOSYSTEMS OF THE SOCHI BLACK SEA REGION

Vitaliy G. Scherbina

Branch of Institute of Natural and Technical Systems in Sochi, Sochi, Krasnodar Region, Russia
v.g.scherbina@bk.ru

© Щербина В.Г., 2022

Abstract. The method of testing water soil extracts was used to study the allelopathic regime of the soil one day and 30 days after the simulated recreational impact in seven forest ecosystems of the Sochi Black Sea region with a monodominant forest stand. It was determined that one-time recreational loads in the analyzed ecosystems are accompanied by an increase in allelopathic soil activity. A noticeable increase in phytotoxicity (16-66 %) is recorded at a load of 2.78-4.17 people/ha. Greater recreational impact (6.2-8.33 people/ha) leads to the formation of a path network, anaerobic conditions and inhibition of the biotest in the range 0.8-1.0. It was found that 30 days after a one-time recreational impact, soil activity is restored to control values only after a load of 1.39 people/ha. After a load of 2.78-4.17 people/ha, only a decrease in phytotoxicity by 9-21 % is observed. In areas after maximum exposure (6.25-8.33 people/ha), phytotoxicity decreases below control values in ecosystems dominated by *Fagus orientalis* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus pubescens* Willd. and *Carpinus betulus* L., indirectly explaining the likelihood of introducing species alien to forest ecosystems along the trails. Significant soil activity persists in ecosystems with *Taxus baccata* L., *Castanea sativa* Mill., and *Buxus colchica* Pojark., explaining their resistance to one-time recreational loads.

Keywords: Sochi Black Sea region, forest ecosystem, recreational load, soil density, allelopathic activity

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task on the topic no. AAAA16-116012510144-6 "Improving the mechanism of environmental management in order to ensure the ecological and economic security of the functioning of the tourism industry".

For citation: Scherbina V.G. Allelopathic Soil Regime after a One-Time Recreational Load in the Forest Ecosystems of the Sochi Black Sea Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(1):96-106. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Почва, выполняя в ценозах функцию ослабления влияния ингибирующих веществ, также является и их аккумулятором [1]. Процессы поглощения почвой колинов при ферментации корневых экссудатов в ризосфере под действием микроорганизмов, влажности, температуры и почвенного воздуха, а также при гуттации, естественном промывании и разложении лесной подстилки [2-4] в комплексе формируют аллелопатические свойства эдафотопы [5-7], т.е. аллелопатическую активность и аллелопатический режим [1, с. 274], контролируя большую часть физиологических процессов: режим водопотребления [8] и минерального питания [9, 10], клеточные циклы проницаемости [11], развитие фотосинтезирующего аппарата, фотосинтез и дыхание [1, 12], образование первичной и вторичной продукции [13] и т.д. В конечном итоге аллелопатические эффекты почвы определяют устойчивость сообществ в стрессовых условиях и биоразнообразии [14], включая механизм противостояния внедрению в экосистемы новых видов [15].

В лесных экосистемах регионов рекреационно-туристской специализации исследования аллелопатической активности почвы, воспринимающей в первую очередь рекреационную нагрузку [16], смогут открыть новые методологические возможности для создания инструмента оценки состояния трансформированных экосистем и организации более эффективных природоохранных мероприятий с целью обеспечения эколого-экономической безопасности функционирования индустрии туризма.

Цель настоящей работы – исследовать аллелопатический режим почвы после разовой рекреационной нагрузки в лесных экосистемах преобладающих формаций Сочинского Причерноморья с монодоминантным древостоем. В задачи входило:

- определить аллелопатическую активность почвы при различной величине рекреационной нагрузки;
- оценить аллелопатическую активность почвы через 30 сут после рекреационного воздействия.

Материалы и методы

Исследования проводились в период весенних дождей (апрель-май 2020 и 2021 гг.) в предгорной зоне Сочинского Причерноморья (зона влажных субтропиков), в лесных экосистемах со средневозрастным одновидовым древостоем, имеющим в составе 10 единиц по запасу: граб обыкновенный

(*Carpinus betulus* L.), бук восточный (*Fagus orientalis* L.), дуб пушистый (*Quercus pubescens* Willd.), дуб скальный (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), каштан посевной (*Castanea sativa* Mill.), самшит колхидский (*Buxus colchica* Pojark), тис ягодный (*Taxus baccata* L.). Среди видов с долей участия менее 2 % запаса встречались [17]: вишня птичья (*Prunus avium* L.), ясень высокий (*Fraxinus excelsior* L.), липа бегониелистная (*Tilia caucasica* Rupr.), клен полевой (*Acer campestre* L.), клен красивый (*Acer laetum* C. A. Mey), клен ложноплатановый (*Acer pseudoplatanus* L.), груша обыкновенная (*Pyrus communis* L.), ольха черная (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), осина обыкновенная (*Populus tremula* L.). Анализируемые экосистемы по напочвенному покрову относились к двум типам экосистем (при составе древостоя): беспокровный (10Бк + Яс, ед. Чрш; 10Кш + Бк ед. Г; 10Смш ед. Лп, Г; 10Тс ед. Бк), разнотравный (10Дчш ед. Г; 10Дпуш + Кш, Г, Бк, Брк, Грш, Чрш; 10Г + Бк).

Почва желто-бурая лесная, маломощная, щепенистая на мелкозернистых песчаниках и глинистых сланцах [18], характеризуется тяжелым механическим составом (табл. 1): в верхних горизонтах легкоглинистая, иловато-пылеватая; в нижних – средне-тяжело-глинистая, пылевато-иловатая. Скелетность верхних горизонтов представлена очень малой каменностью – в среднем 1,4 % по объему, в том числе частиц крупнее 3 мм – 0,8 %. Растительные включения (в основном корни) составляют в среднем 2,1 % по объему, общий объем твердых включений – 3,5 % по объему.

Таблица 1 / Table 1

Гранулометрический состав почвы / Granulometric composition of the soil

Средняя глубина слоя, см	Размер фракции, мм						Из них	
	1,0–0,25	0,25–0,05	0,50–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01	> 0,01
2–12	6,3	13,3	9,8	14,2	32,9	23,5	70,6	29,4
15–20	4,8	11,9	8,0	13,5	35,4	26,4	75,3	24,7
40–50	4,7	9,2	9,2	13,6	36,0	27,3	76,9	23,1
> 65	2,0	6,1	7,4	18,0	30,6	35,9	84,4	15,5

Разовые рекреационные нагрузки имитировались путем вытаптывания [19], с учетом методических рекомендаций моделирования шаговой нагрузки [20] и продолжительности сезона рекреационного посещения – 1200 ч [21, с. 57], на учетных площадках 1,43×0,71 м (8-кратная повторность), при визуальном отсутствии нарушений напочвенного покрова, в пяти вариантах: 10, 20, 30, 45, 60 мин (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Параметры имитации рекреационных нагрузок / Parameters of simulation of recreational loads

Время нагрузки, мин	Рекреационная нагрузка			Плотность почвы, г/см ³	Запас подстилки, кг/м ²
	чел.мин/м ²	чел.ч/га	чел.ч/га – сезон, чел./га		
0	–	–	–	0,81–0,85	0,346–0,610
10	10	1666,7	1,39	0,89–0,91	0,309–0,547
20	20	3333,3	2,78	0,99–1,11	0,231–0,297
30	30	5000,0	4,17	1,14–1,19	0,119–0,180
45	45	7500,0	6,25	1,20–1,44	0,000–0,021
60	60	10000,0	8,33	1,46–1,66	–

Пробы почвы отбирали на учетных площадках перед имитацией нагрузки (контроль) и в два этапа после вытаптывания, с интервалом через сутки и через 30 сут, методом конверта (5-кратная повторность) в верхнем горизонте почвы (0–10 см) буром ударного типа, с последующим стандартным определением плотности почвы.

Пробы лесной подстилки для определения запаса брали с использованием рамок 20×20 см в 6-кратной повторности.

Аллелопатические характеристики почвы определяли общепринятыми методами в два этапа: 1) определение количества колинов методом биотеста [22, с. 304] с переводом всхожести семян в условные кумариновые единицы (УКЕ); 2) расчет ингибирующей активности колинов.

По рекомендациям [1, 22] аналитические пробы готовили на водной вытяжке (1:10); биотестом служили семена редьки (*Raphanus sativus* var. *radicula* Pers.); количество колинов рассчитывали по шкале УКЕ А.М. Гродзинского [22, с. 306]. Ингибирующую активность колинов (фитотоксичность) определяли по индексу аллелопатической активности, разработанному Н.О. Симагиной и Н.Ю. Лысяковой [23, с. 274]:

$$A = \frac{S_o - S_k}{S_o},$$

где A – аллелопатическая активность; S_o – содержание УКЕ в опыте; S_k – содержание УКЕ в контроле. Повышение (снижение) значений аллелопатической активности отражает повышение (снижение) ингибирующей активности колинов.

Статистическая обработка включала стандартные методы оценки вариационных рядов и дисперсионный двухфакторный анализ при иерархической схеме [24]. В качестве источников варьирования принимались 5 вариантов рекреационной нагрузки в факторе A (рекреация) и дифференциация экосистем по биоэкологическим особенностям древесного вида – доминанта в факторе B (экосистема).

Всего в каждой исследуемой экосистеме, на отдельных вариантах моделируемой нагрузки анализ аллелопатической активности проводили по результатам 40 проб почвы.

Полученные результаты

Проведенные разовые рекреационные нагрузки в диапазоне от 1,39 до 8,33 чел/га (табл. 2) привели к вариации плотности почвы в диапазоне 0,86–1,66 г/см³ и лесной подстилки – от 0,547 до 0,000 кг/м². Реакция на нагрузку между лесными экосистемами (рис. 1) имеет отличительные особенности, обусловленные комплексным влиянием многих факторов (состав и жизненное состояние древостоя, гранулометрический состав почвы, влажность, температура, кислотность среды и т.д.), в целом отражающие прямые и косвенные индикационные связи в рекреационно трансформированных экосистемах Сочинского Причерноморья [25–28].

Из общих закономерностей, согласующихся со многими исследованиями [18, 20, 21, 28, 29], отмечают:

- 1) большие величины плотности почвы характерны для экосистем с большей скоростью разложения лесной подстилки и/или меньшим ее запасом;
- 2) величина разрушения подстилки зависит от рекреационной нагрузки и биоэкологических особенностей доминирующего вида в древостое.

Несмотря на значительную пространственную вариацию запаса, подстилка считается очень чувствительным индикатором [25, 28]. Механическое разрушение подстилки на 2,3–33,8 % ($\bar{x} = 18,2$ %) при нагрузке в 1,39 чел/га в первые сутки (рис. 2а) сопровождается ростом аллелопатической активности почвы, составляя увеличение ингибирования на 0,2–6,0 % ($\bar{x} = 2,3$ %). Изменения при данной нагрузке не являются статистически достоверными ($t_{\text{факт.}} < t_{\text{табл.}}$ при $P = 0,05$: 1,71–1,94 < 1,96) и, следовательно, могут только отражать общую закономерность реакции верхнего горизонта почвы на влияние рекреации. При большем воздействии на почву (диапазон нагрузок 2,78–4,17 чел/га) регистрируется тесная обратная связь запаса подстилки с аллелопатической активностью ($r = -86,6 - -98,2$ %) во всех анализируемых экосистемах.

Большие рекреационные нагрузки (6,25 чел/га) в аналогичных лесных сообществах Сочинского Причерноморья при хронической нагрузке [21, 28] приводят к анаэробным условиям, исчезновению подстилки на тропях большинства экосистем и деформации гумусо-аккумулятивного горизонта; нагрузка в 8,33 чел/га приводит к уплотнению верхнего горизонта до типичной плотности иллювиального горизонта [20, 23]. В условиях эксперимента диапазон корреляции аллелопатической активности почвы с плотностью верхнего горизонта составляет 75,1–89,2 %; почвенные фильтраты проявляют значительную активность ($R^2 = 0,896-0,977$), вплоть до полного угнетения биотеста (УКЕ кумарина 1364 мг/л), т.е. с ростом ингибирования до 0,8–1,0 (рис. 2а). Большая активность почвы отмечается в экосистемах с доминированием *Fagus orientalis* и *Carpinus caucasica*, характеризующихся полным разрушением подстилки и максимальным уплотнением почвы (рис. 1).

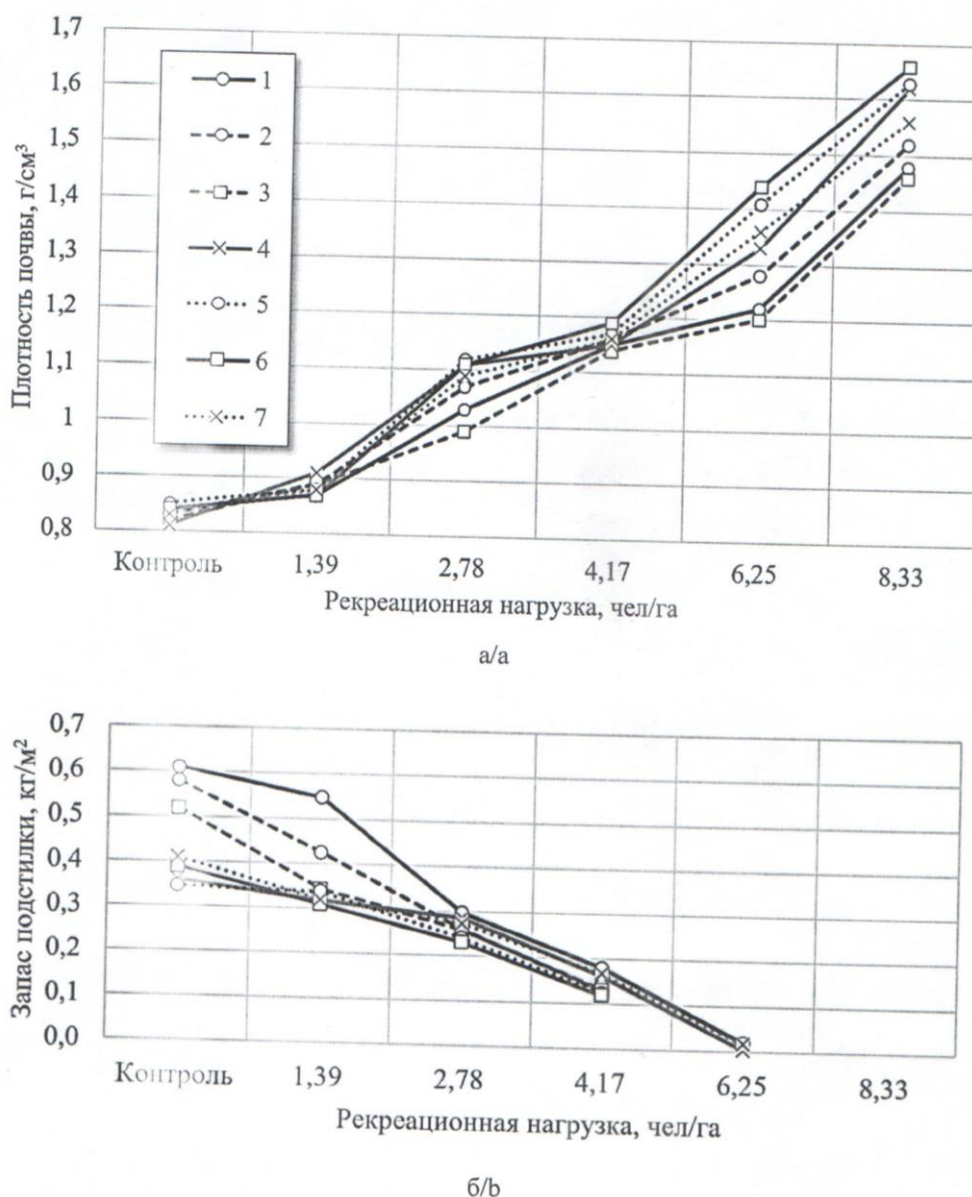


Рис. 1. Динамика плотности почвы (а) и запаса лесной подстилки (б) при рекреационных нагрузках в лесных экосистемах с древостоем: 1 – *Castanea sativa*; 2 – *Quercus petraea*; 3 – *Quercus pubescens*; 4 – *Buxus colchica*; 5 – *Fagus orientalis*; 6 – *Carpinus caucasica*; 7 – *Taxus baccata* / Fig. 1. Dynamics of soil density (a) and stock of forest litter (b) under recreational loads in forest ecosystems with stands: 1 - *Castanea sativa*; 2 - *Quercus petraea*; 3 - *Quercus pubescens*; 4 - *Buxus colchica*; 5 - *Fagus orientalis*; 6 - *Carpinus caucasica*; 7 - *Taxus baccata*

По исследованиям в антропогенно ненарушенной среде и лабораторных условия х полагают [1, 22], что при недостатке почвенного кислорода аэробная микрофлора переходит в неактивное состояние, замещаясь на аммонифицирующие и денитрифицирующие бактерии, усиливая накопление колинов и микробиологических процессов в корнеобитаемом слое в направлении почвоутомления. С изменением почвенной структуры и физико-химических показателей идет развитие фитопатогенной микрофлоры с усилением одностороннего выноса питательных веществ [30, 31], сопровождаемого обеднением почвы [32] и нарушением биохимического баланса [33, 34].

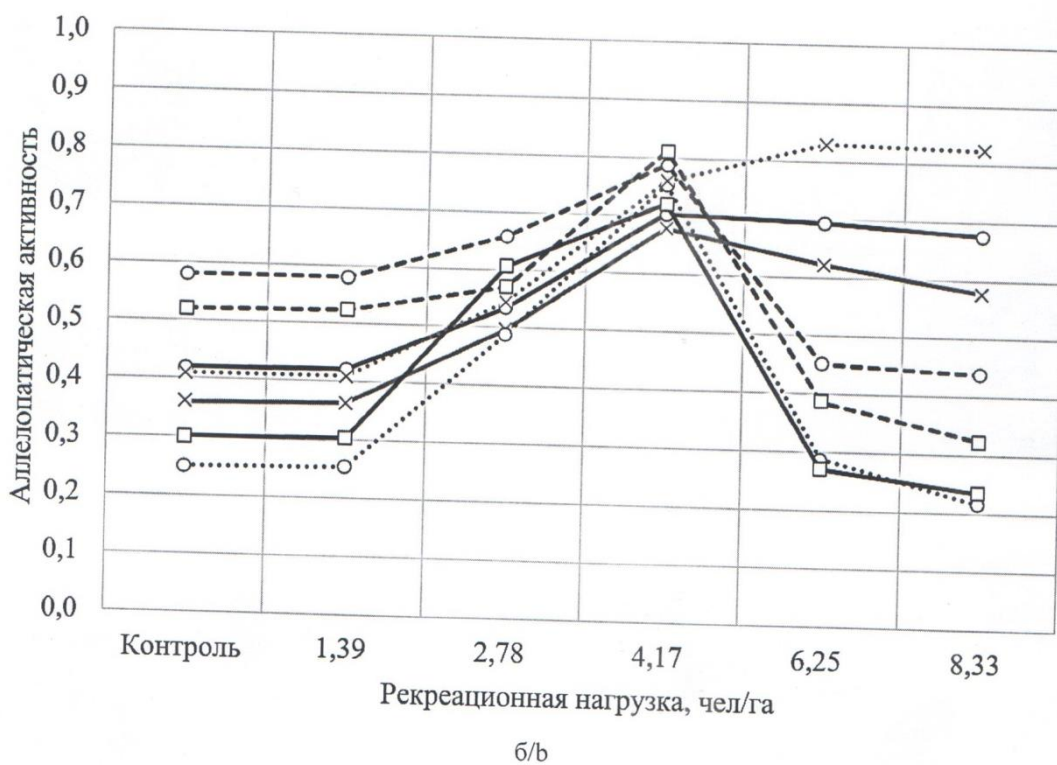
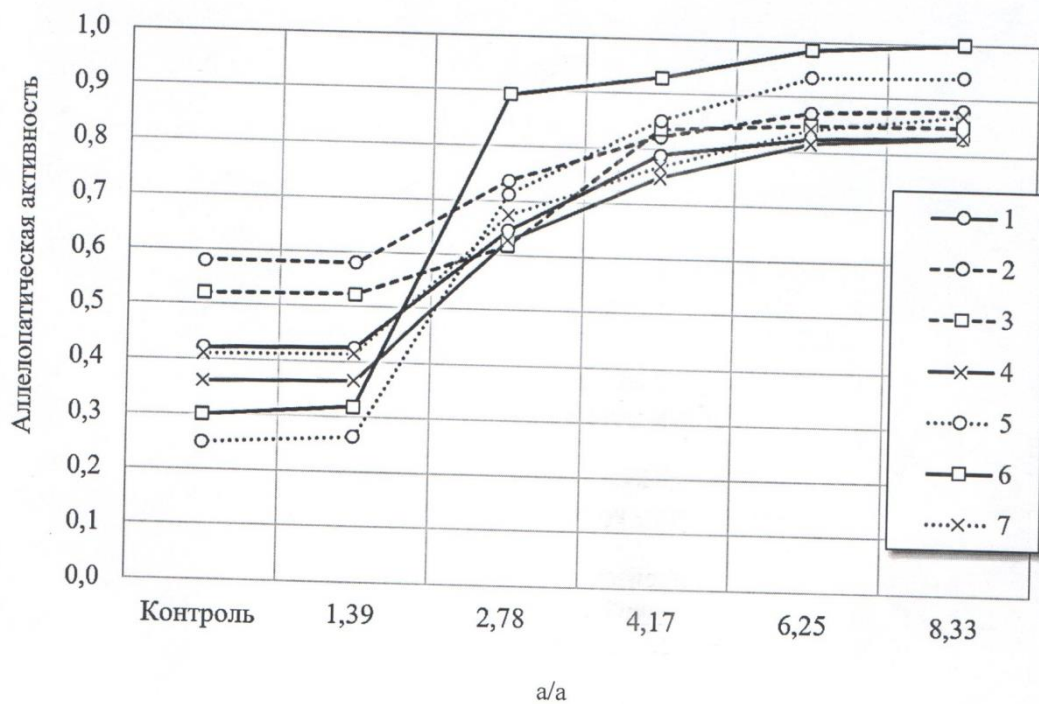


Рис. 2. Фитотоксичность почвы в одновидовых насаждениях через сутки (а) и 30 сут (б) после разовой рекреационной нагрузки: 1 – *Castanea sativa*; 2 – *Quercus petraea*; 3 – *Quercus pubescens*; 4 – *Buxus colchica*; 5 – *Fagus orientalis*; 6 – *Carpinus caucasica*; 7 – *Taxus baccata* / Fig. 2. Soil phytotoxicity in single-species plantations in a day (a) and 30 days (b) after a one-time recreational load: 1 - *Castanea sativa*; 2 - *Quercus petraea*; 3 - *Quercus pubescens*; 4 - *Buxus colchica*; 5 - *Fagus orientalis*; 6 - *Carpinus caucasica*; 7 - *Taxus baccata*

Через 30 сут, после моделирования разовой нагрузки (рис. 2b), величина фитотоксичности рекреационно трансформированной почвы во всех экосистемах снижается ($R^2 = 0,575-0,993$), указывая на протекающие процессы восстановления эдафической среды. В естественных условиях (не нарушенных) снижение токсичности на 20–25-е сут А.М. Гродзинским [1] объясняется способностью почв поглощать колины при слабой насыщенности органическими соединениями. Также есть мнение, что аллелотоксины с течением времени могут снижать свою концентрацию в результате переноса в нижележащие горизонты с почвенной влагой [35].

Большие изменения регистрируются в сформированных анаэробных условиях, т.е. при нагрузке $\geq 6,25$ чел/га [27, 28]. Так, при 1,39 чел/га (аэриобиоз) на 30-е сут отмечено восстановление величин фитотоксичности до контрольных значений; при 2,78–4,17 чел/га (аэриобиоз) интенсивность снижения по средним выборочным составляет 8,8–20,8 %, при 6,25–8,33 чел/га (анаэриобиоз) – 40,7–45,6 %.

Снижение фитотоксичности в анаэробных условиях ниже контрольных значений, регистрируемое в отдельных экосистемах (с доминированием *Fagus orientalis*, *Quercus robur* и *Q. pubescens*, *Carpinus caucasica*), опосредованно указывает на повышающийся потенциал к проникновению в лесные сообщества чужеродных видов, с высокой аллелопатической активностью [36]. Также установлена обратная зависимость ($r = -0,472 - -0,860$) между аллелопатической активностью и величиной адвентивизации лесных ценозов [37]. Значительная устойчивость к синантропизации отмечается в экосистемах с доминированием *Castanea sativa*, *Buxus colchica* и *Taxus baccata*, подтверждая ранее полученные результаты при стадиях рекреационной дигрессии [25, 27, 28].

Дисперсионный анализ, призванный оценить долю влияния величины рекреационной нагрузки и биоэкологических особенностей древесных видов лесных экосистем на динамику аллелопатической активности почвы, показал (табл. 3), что через сутки после моделируемой нагрузки на аллелопатическую активность почвы достоверно влияют (при $P = 0,01$) особенности древостоя (38 %) и величина рекреационной нагрузки (40 %).

Таблица 3 / Table 3

Дисперсионный анализ влияния рекреационной нагрузки в различных экосистемах на динамику аллелопатической активности почвы / Dispersion analysis of the influence of recreational load in different ecosystems on the dynamics of soil allelopathic activity

Источник варьирования	ss	df	ms	$F_{\text{факт.}}$	$F_{\text{табл. при } P}$		Степень влияния
					0,05	0,01	
Через сутки							
Рекреационная нагрузка	104,67	4	26,17	7,95	2,69	4,02	0,401
Экосистема	98,75	30	3,29	77,98	1,46	1,70	0,378
Случайные отклонения	57,62	1365	0,04	–	–	–	0,221
Общее	261,03	1399	1,44	–	–	–	–
Через 30 сут							
Рекреационная нагрузка	40,49	4	10,12	3,67	2,69	4,02	0,158
Экосистема	82,76	30	2,76	28,41	1,46	1,70	0,324
Случайные отклонения	132,55	1365	0,10	–	–	–	0,518
Общее	255,80	1399	4,35	–	–	–	–

Примечание. ss – сумма квадратов; df – число степеней свободы; ms – дисперсия.

Через 30 сут полевого эксперимента влияние биоэкологических особенностей (32 %) на аллелопатию остается достоверным при $P = 0,01$. Вклад рекреационной нагрузки (16 %) в изменчивость аллелопатии снижается, оставаясь достоверным только при значимости 0,05. Это говорит о снижении влияния на аллелопатический режим почвы такого фактора, как рекреационная нагрузка, ввиду протекающих восстановительных процессов в верхнем горизонте почвы. Увеличение влияния неучтенных факторов с 22 до 52 % подтверждает ранее полученные результаты по активации процессов, связанных с трансформацией абиотических факторов и структурных характеристик ценопопуляций [16, 36, 38, 39] в рекреационных лесах.

Через 30 сут, после моделирования разовой нагрузки (рис. 2b), величина фитотоксичности рекреационно трансформированной почвы во всех экосистемах снижается ($R^2 = 0,575-0,993$), указывая на протекающие процессы восстановления эдафической среды. В естественных условиях (не нарушенных) снижение токсичности на 20–25-е сут А.М. Гродзинским [1] объясняется способностью почв поглощать колины при слабой насыщенности органическими соединениями. Также есть мнение, что аллелотоксины с течением времени могут снижать свою концентрацию в результате переноса в нижележащие горизонты с почвенной влагой [35].

Большие изменения регистрируются в сформированных анаэробных условиях, т.е. при нагрузке $\geq 6,25$ чел/га [27, 28]. Так, при 1,39 чел/га (аэриобиоз) на 30-е сут отмечено восстановление величин фитотоксичности до контрольных значений; при 2,78–4,17 чел/га (аэриобиоз) интенсивность снижения по средним выборочным составляет 8,8–20,8 %, при 6,25–8,33 чел/га (анаэриобиоз) – 40,7–45,6 %.

Снижение фитотоксичности в анаэробных условиях ниже контрольных значений, регистрируемое в отдельных экосистемах (с доминированием *Fagus orientalis*, *Quercus robur* и *Q. pubescens*, *Carpinus caucasicus*), опосредованно указывает на повышающийся потенциал к проникновению в лесные сообщества чужеродных видов, с высокой аллелопатической активностью [36]. Также установлена обратная зависимость ($r = -0,472 - -0,860$) между аллелопатической активностью и величиной адвентивизации лесных ценозов [37]. Значительная устойчивость к синантропизации отмечается в экосистемах с доминированием *Castanea sativa*, *Vixus colchica* и *Taxus baccata*, подтверждая ранее полученные результаты при стадиях рекреационной дигрессии [25, 27, 28].

Дисперсионный анализ, призванный оценить долю влияния величины рекреационной нагрузки и биоэкологических особенностей древесных видов лесных экосистем на динамику аллелопатической активности почвы, показал (табл. 3), что через сутки после моделируемой нагрузки на аллелопатическую активность почвы достоверно влияют (при $P = 0,01$) особенности древостоя (38 %) и величина рекреационной нагрузки (40 %).

Таблица 3 / Table 3

Дисперсионный анализ влияния рекреационной нагрузки в различных экосистемах на динамику аллелопатической активности почвы / Dispersion analysis of the influence of recreational load in different ecosystems on the dynamics of soil allelopathic activity

Источник варьирования	ss	df	ms	$F_{\text{факт.}}$	$F_{\text{табл.}}$ при P		Степень влияния
					0,05	0,01	
Через сутки							
Рекреационная нагрузка	104,67	4	26,17	7,95	2,69	4,02	0,401
Экосистема	98,75	30	3,29	77,98	1,46	1,70	0,378
Случайные отклонения	57,62	1365	0,04	–	–	–	0,221
Общее	261,03	1399	1,44	–	–	–	–
Через 30 сут							
Рекреационная нагрузка	40,49	4	10,12	3,67	2,69	4,02	0,158
Экосистема	82,76	30	2,76	28,41	1,46	1,70	0,324
Случайные отклонения	132,55	1365	0,10	–	–	–	0,518
Общее	255,80	1399	4,35	–	–	–	–

Примечание. ss – сумма квадратов; df – число степеней свободы; ms – дисперсия.

Через 30 сут полевого эксперимента влияние биоэкологических особенностей (32 %) на аллелопатию остается достоверным при $P = 0,01$. Вклад рекреационной нагрузки (16 %) в изменчивость аллелопатии снижается, оставаясь достоверным только при значимости 0,05. Это говорит о снижении влияния на аллелопатический режим почвы такого фактора, как рекреационная нагрузка, ввиду протекающих восстановительных процессов в верхнем горизонте почвы. Увеличение влияния неучтенных факторов с 22 до 52 % подтверждает ранее полученные результаты по активации процессов, связанных с трансформацией абиотических факторов и структурных характеристик ценопопуляций [16, 36, 38, 39] в рекреационных лесах.

17. Щербина В.Г. Рекреационные изменения аллелопатической активности корневых систем древостоя в лесных экосистемах // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 4 (212). С. 103–112. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-103-112.
18. Щербина В.Г. Оценка рекреационного повреждения почвенного покрова // Экол. вестн. Северного Кавказа. 2007. Т. 3, № 4. С. 37–41.
19. 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.
20. Ивонин В.М. Рекреология. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 240 с.
21. Ивонин В.М., Авдонин В.Е., Пеньковский Н.Д. Рекреационная экология горных лесов российского Причерноморья. Краснодар: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 271 с.
22. Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1991. 532 с.
23. Симагина Н.О., Лысякова Н.Ю. Динамика аллелопатической активности *Vupleurum fruticosum L.* в течение вегетации и онтогенеза // Учен. записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Биология, химия. 2011. Т. 24 (63), № 4. С. 273–281.
24. Рокицкий П.Ф. Биологическая статистика. Минск: Высшая школа, 1964. 328 с.
25. Щербина В.Г., Белюченко И.С. Мониторинг окружающей среды: методологические основы. Сочи: Изд-во ИЭиВС, 2006. 356 с.
26. Щербина В.Г. Фоновые экосистемы санно-бобслейного комплекса. Кривой Рог: Видавничий дiм, 2010. 176 с.
27. Щербина В.Г. Экология самшитовых биогеоценозов. Донецк: Стандарт, 2008. 347 с.
28. Щербина В.Г., Щербина Ю.Г. Рекреационные ресурсы Северного Кавказа. Буковые экосистемы: в 4 ч. Кривой Рог: Минерал, 2006. Ч. 1. 500 с.
29. Гордиенко В.А., Солнцев Г.К. Лесные пользования на Северном Кавказе. М.: ВНИИЩлесресурс, 1999. 472 с.
30. Иванова Н.А. Влияние переувлажнения на микрофлору подзолисто-глеевых почв и использование ячменем азота и фосфора : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1972. 26 с.
31. Гродзинский А.М., Головкин Е.А., Горобец С.А. Экспериментальная аллелопатия. Киев: Наукова думка, 1975. 230 с.
32. Баранецкий Г.Г. О фитоценотической роли колючих корней липы мелколистной // Физиолого-биохимические основы взаимодействия растений в фитоценозах. Киев: Наукова думка, 1973. Вып. 4. С. 100–103.
33. Гринева Г.М. О выделении веществ корнями растений при кратковременном анаэробии // Физиология растений. 1961. Т. 8, № 6. С. 123–131.
34. Гортинский Г.Б. Аллелопатия и биоценология // Бюл. Московского общества испытателей природы. 1963. Т. 68, № 6. С. 32–41.
35. Федотов Г.Н., Горепекин И.В., Позднякова А.Д., Загородняя Ю. А., Исакова С.А. Взаимосвязь предистории использования и химических свойств почв с их аллелотоксичностью // Почвоведение. 2020. № 3. С. 379–386. Doi: 10.31857/S0032180X2003003X.
36. Прохоров В.Н. Аллелопатический потенциал адвентивных видов с высокой инвазионной активностью во флоре Беларуси // Изв. Нац. АНБ. Биол. науки. 2018. Т. 63, № 2. С. 163–170. Doi: 10.29235/1029-8940-2018-63-2-163-170.
37. Щербина В.Г. Аллелопатическая напряженность биотопов в лесных экосистемах влажных субтропиков // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 1. С. 95–106. Doi: 10.33075/2220-5861-2021-1-95-106.
38. Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П. Аллелотоксины в почвах и стимуляция развития семян // Лесной вестн. / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 5. С. 62–70.
39. Левченко П.В., Гетманец И.А., Викторова В.П. Результаты биотестирования эдафотопов некоторых видов широколиственных пород в Ашинском государственном природном биологическом заказнике (Челябинская обл.) // Вестн. Тверского гос. ун-та. Биология и экология. 2020. № 2 (58). С. 84–93.

References

1. Grodzinsky A.M., Bogdan G.P., Golovko E.Ya. *Allelopathic soil fatigue*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1979. 248 p. (In Russ.).
2. Gallet C., Pellissier F. Phenolic compounds in natural solutions of a coniferous forest. *Journal of Theoretical Biology*. 1997;(23):2401-2412.
3. Roshchina V.V., Roshchina V.D. External secretion. *The Excretory Function of Higher Plants*. Berlin: Springer; 1993:67-130.
4. Bertin C., Yang X., Weston L.A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. *Plant and Soil*. 2003;256(1):67-83.
5. Cheng F., Cheng Z. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy. *Frontiers in Plant Science*. 2015;6:1020.

6. Derfling K. *Plant hormones. Systems approach*. Moscow: Mir Publ.; 1985. 303 p. (In Russ.).
7. Kavelenova L.M., Lishchinskaya S.N., Karandaeva L.N. Features of the seasonal dynamics of water-soluble phenolic compounds in the leaves of silver birch in an urban environment in the forest-steppe (for example, Samara). *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*. 2001;(3):91-96. (In Russ.).
8. Barkosky R.R., Einhellig F.A. Allelopathic interference of plant-water relationships. *Journal of Theoretical Biology*. 2003;(44):53-58.
9. Booker F.L., Blum U., Fiscus E.L. Short-term effects of ferulic acid on ion uptake and water relations in cucumber seedlings. *The American Naturalist*. 1992;(93):649-655.
10. Yu J.Q., Matsui Y. Effects of root exudates of cucumber (*Cucumis sativus*) and allelochemicals on ion uptake by cucumber seedlings. *Forest Ecology and Management*. 1997;(23):817-827.
11. Sanchez-Moreiras A., Gonzalez L., Reigosa M.J. Small-scale distribution of plants in the vicinity of competitors: Possible effects of allelopathy. *Allelopathy*. 2003;(11):185-194.
12. Kagan I.A., Rimando A.M., Dayan F.E. Chromato-graphic separation and in vitro activity of sorgoleone congeners from the roots of *Sorghum bicolor*. *Journal of Theoretical Biology*. 2003;(51):7589-7595.
13. Duran-Serantes B., Gonzalez L., Reigosa M. Comparative physiological effects of three allelochemicals and two herbicides on *Dactylis glomerata*. *Forest Ecology and Management*. 2002;24:385-392.
14. Grodzinsky A.M. Some problems of studying the allelopathic interaction of plants. *Interaction of plants and microorganisms in phytocenoses*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1977:3-12. (In Russ.).
15. Cummings J.A., Parker I.M., Gilbert G.S. Allelopathy: a tool for weed management in forest restoration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2012;213(12):1975-1989.
16. Khalikova O.V., Isyanyulova R.R. The influence of recreation on the state of the soil cover of the Black Sea coast of Russia. *Forestry Bulletin*. 2019;23(6):51-59. Doi: 10.18698 / 2542-1468-2019-6-51-59. (In Russ.).
17. Scherbina V.G. Recreational changes in the allelopathic activity of the root systems of the stand in forest ecosystems. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(4):103-112. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-103-112. (In Russ.).
18. Shcherbina V.G. Assessment of recreational soil damage. *Ekol. vestn. Severnogo Kavkaza = The North Caucasus Ecological Herald*. 2007;3(4):37-41. (In Russ.).
19. *Temporary methodology for determining recreational loads on natural complexes when organizing tourism, excursions, mass everyday recreation and the time norms of these loads*. Moscow: Central Bureau of Scientific and Technical Information of the Leskhoz Press; 1987. 34 p. (In Russ.).
20. Ivonin V.M. *Recreology*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2008. 240 p. (In Russ.).
21. Ivonin V.M., Avdonin V.E., Penkovsky N.D. *Recreational ecology of mountain forests of the Russian Black Sea region*. Krasnodar: North-Caucasian Scientific Center Higher School Press; 2000. 271 p. (In Russ.).
22. Grodzinsky A.M. *Allelopathy of plants and soil fatigue*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1991. 532 p. (In Russ.).
23. Simagina N.O., Lysyakova N.Yu. Dynamics of the allelopathic activity of *Bupleurum fruticosum* L. during the growing season and ontogenesis. *Uchen. zapiski Tavricheskogo nats. un-ta im. V. I. Vernadskogo. Biologiya, khimiya = Scientific Notes of the Vernadsky Tavrichesky National University. Biology, Chemistry*. 2011;24(4):273-281. (In Russ.).
24. Rokitsky P.F. *Biological statistics*. Minsk: Higher School Press; 1964. 328 p. (In Russ.).
25. Shcherbina V.G., Belyuchenko I.S. *Environmental monitoring: methodological foundations*. Sochi: IEiVS Publ.; 2006. 356 p. (In Russ.).
26. Shcherbina V.G. *Background ecosystems of the bobsleigh complex*. Krivoy Rog: Vidavnichii dim Publ.; 2010. 176 p. (In Russ.).
27. Shcherbina V.G. *Ecology of boxwood biogeocenoses*. Donetsk: Standard Publ.; 2008. 347 p. (In Russ.).
28. Shcherbina V.G., Shcherbina Yu.G. *Recreational resources of the North Caucasus. Beech ecosystems*: in 4 vol. Krivoy Rog: Mineral Publ.; 2006. Vol. 1. 500 p. (In Russ.).
29. Gordienko V.A., Solntsev G.K. *Forest uses in the North Caucasus*. Moscow: VNIITslesresurs Publ.; 1999. 472 p. (In Russ.).
30. Ivanova N.A. *Influence of waterlogging on the microflora of podzolic-gley soils and the use of nitrogen and phosphorus by barley*. Dissertation Thesis. Leningrad, 1972. 26 p. (In Russ.).
31. Grodzinsky A.M., Golovko E.A., Gorobets S.A. *Experimental allelopathy*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1975. 230 p. (In Russ.).
32. Baranetsky G.G. On the phytocenotic role of colins in the roots of small-leaved linden. *Physiological and biochemical bases of plant interaction in phytocenoses*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1973; Vol. 4:100-103. (In Russ.).
33. Grineva G.M. On the release of substances by plant roots during short-term anaerobiosis. *Fiziologiya rastenii = Russian Journal of Plant Physiology*. 1961;8(6):123-131. (In Russ.).
34. Gortinsky G.B. Allelopathy and biocenology. *Byul. Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody = Bulletin of the Moscow Society of Naturalists*. 1963;68(6):32-41. (In Russ.).
35. Fedotov G.N., Gorepekin I.V., Pozdnyakova A.D., Zavgorodnyaya Yu.A., Isakova S.A. The relationship between the history of the use and chemical properties of soils with their allelotoxicity. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2020;(3):379-386. Doi: 10.31857/S0032180X2003003X. (In Russ.).

36. Prokhorov V.N. Allelopathic potential of adventitious species with high invasive activity in the flora of Belarus. *Izv. Nats. ANB. Biol. nauki = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series.* 2018;63(2):163-170. (In Russ.).

37. Shcherbina V.G. Allelopathic intensity of biotopes in forest ecosystems of humid subtropics. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy = Monitoring Systems of Environment.* 2021;(1):95-106. Doi: 10.33075/2220-5861-2021-1-95-106. (In Russ.).

38. Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P. Allelotoxins in soils and stimulation of seed development. *Forestry Bulletin.* 2019;23(5):62-70. (In Russ.).

39. Levchenko P.V., Getmanets I.A., Viktorov V.P. Results of biotesting of edaphotopes of some broad-leaved species in the Ashinsky State Natural Biological Reserve (Chelyabinsk region). *Vestn. Tverskogo gos. un-ta. Biologiya i ekologiya = Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology.* 2020;(2):84-93. (In Russ.).

Информация об авторе

Щербина В.Г. – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Information about the author

Scherbina V.G. - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 04.10.2021; одобрена после рецензирования 14.01.2022; принята к публикации 16.03.2022.
The article was submitted 04.10.2021; approved after reviewing 14.01.2022; accepted for publication 16.03.2022.