

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ОСЛАБЛЕНИЯ ХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ В РЕКРЕАЦИОННЫХ НАСАЖДЕНИЯХ

А.С. Алексеев¹, О.А. Ходачек¹, А.В. Селиховкин^{1, 2}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет

и ² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Эл. почта: a_s_alekseev@mail.ru; teremoi@yandex.ru; a.selikhovkin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2019; принята к печати 06.05.2019

Исследования проводились с 2015 по 2018 г. на 11 постоянных пробных площадях, заложенных в рекреационных насаждениях сосны *Pinus sylvestris* и ели *Picea abies* в Санкт-Петербурге и Выборге и в насаждениях общего пользования г. Нарва-Йыэсуу (Эстония). Основные факторы ослабления насаждений как сосны, так и ели, – сумма токсичных солей и кислотность почвы. С ними коррелируют уровни ионов натрия, хлора, магния, кальция, гидрокарбоната и сульфат-иона. Наиболее сильна корреляционная связь состояния насаждений ели с концентрацией ионов хлора. Коэффициенты регрессий оценок состояния насаждений сосны и ели на оценки загрязнения почв токсичными солями значимо не различаются, несмотря на различия в организации корневых систем ели. Возможная причина – проникновение токсичных солей в более глубокие слои почвы. Воздействие рекреационных нагрузок, дендропатогенных организмов, вредителей и погодных условий не влияет на состояние насаждений, но при максимальном уровне загрязнения и наилучшем состоянии насаждений отмечена наибольшая активность вредителей и патогенов. Полученные регрессионные уравнения могут быть использованы для прогнозов состояния древостоев сосны и ели в зависимости от загрязнения почв по двум уровням – летальном и предельно допустимом. Найденные различия пороговых значений загрязнения, стандартных ошибок регрессионных коэффициентов, минимальных и максимальных пороговых величин загрязнений почв токсичными солями между анализируемыми породами невелики. Это позволяет использовать средние от пороговых значений в качестве нормативов предельно допустимого и летального загрязнений почв, а также для мониторинга и прогнозирования состояния древостоев.

Ключевые слова: ель европейская, сосна обыкновенная, состояние древостоев, экологические факторы, токсичные соли.

AN ANALYSIS OF FACTORS THAT CAUSE CONIFEROUS STANDS TO DECAY IN RECREATION AREAS

A.S. Alekseyev¹, O.A. Khodachek¹, A.V. Selikhovkin^{1, 2}

¹ Saint-Petersburg Forest Technical University and ² Saint Petersburg State University,
Saint Petersburg, Russia city

Email: a_s_alekseev@mail.ru; teremoi@yandex.ru; a.selikhovkin@mail.ru

In 2015 through 2018, eleven test plots were studied in recreation areas planted with *Pinus sylvestries* pine trees and *Picea albea* spruce trees. The plots were located in Saint Petersburg and Vyborg (Russia) and Narva-Jõesuu (Estonia). The main factor of decay of both pines and spruces were total toxic salt levels in soil and acidity of soil. Correlated with these factors are the levels of sodium, magnesium, calcium, chloride, bicarbonate, and sulfate ions. The conditions of spruces correlated most significantly with chloride ion levels. The coefficients of regression of the estimates of conditions of pines and spruces on the estimates of soil pollution are not different, in spite of the fact that the arrangements of roots are different in the two tree species. A possible cause of the lack of differences in the coefficients is that toxic salts diffuse into deep soil layers. Factors associated with the presence of humans in the respective recreation areas, as well as pests and climate do not influence the stands. However, upon the highest pollution and the associated attenuation of stands, the activities of pests are highest. Regressions found based on the results obtained during the study may be used for forecasting the conditions of pine and spruce stands at lethal and maximum permissible levels of soil pollution. Differences in the threshold levels of pollution and in the standard errors of regression coefficients between study sites are not high. This makes it possible to use the mean values of these parameters as reference values of maximum permissible and lethal levels of soil pollution and for monitoring and forecasting the conditions of coniferous stands.

Keywords: European spruce, Scots pine, the condition of forest stands, ecological factors, toxic salts.

Введение

Рекреационные насаждения, парки и лесопарки испытывают воздействие нескольких специфических факторов, приводящих к ослаблению и гибели древостоев. В зависимости от расположения и структуры насаждений роль этих факторов может существенно отличаться. В урбанизированной или техногенной среде наиболее интенсивное воздействие может оказывать загрязнение воздуха и почвы. В пригородных парках и лесопарках основным фактором могут оказаться рекреационные нагрузки. Роль вредителей и болезней в каждом случае может выступать как самостоятельный фактор, связанный с целым рядом особенностей конкретных насаждений. В качестве таких особенностей могут выступать структуры популяций патогенов и вредителей, удаленность парковых насаждений от лесных массивов, которые могут служить источником распространения возбудителей болезней и вредителей, состояние и структура насаждений, микроклиматические условия и др. Выявление факторов, доминирующих в процессе ослабления и разрушения древостоев, и установление взаимосвязей между этими факторами затруднены сложностью получения количественной оценки уровня воздействия этих факторов и сопоставления разнородных показателей. Такую задачу удастся решать для лесных экосистем, испытывающих интенсивное воздействие стрессовых факторов [10, 17, 18, 23]. Сложнее ее решать при относительно слабом воздействии стрессовых факторов, так как градиент изменения показателей состояния древостоев, относительно которого оценивается интенсивность воздействия факторов, невелик. Однако решение именно этой задачи важно для понимания сукцессионных процессов в антропогенных лесных экосистемах и для оптимизации методов управления такими экосистемами.

Исследований воздействия различных факторов на лесные экосистемы немало. По этой проблеме опубликован ряд монографий и подготовлены многочисленные диссертационные работы [1, 4, 5, 7–9, 11, 13, 15–16, 19–22]. Однако проблема не теряет своей актуальности, так как установление причинно-следственных связей ослабления древостоев в относительно стабильных экосистемах пока не имеет общего решения. Цель данной работы – выявить ключевые факторы ослабления древостоев в насаждениях, испытывающих не критические антропогенные нагрузки.

Объекты и методика исследований

Объектами исследования были рекреационные насаждения сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* (Linnaeus, 1758) и ели европейской *Picea abies* (Linnaeus, 1753) Н. Karst, расположенные в Санкт-Петербурге (Баболовский парк, пейзажная часть Павлов-

ского парка – район «Белая береза», парк «Сосновка» и Молодежное участковое лесничество), в Выборге (историческая часть музея-заповедника «Парк Монрепо») и в насаждениях общего пользования г. Нарва-Йыэсуу уезда Ида-Вирумаа в Эстонии (рис. 1).

Постоянные пробные площади (ППП) подобраны так, чтобы они содержали однородные по составу древостои, находились в границах одного типа леса и в сходных климатических условиях (табл. 1 и 2). Всюду преобладают дерново-подзолистые почвы с участками торфяно-подзолистых, торфяно-глеевых и торфяных почв и дерново-карбонатные почвы.

Климат территорий, на которых расположены парки Сосновка, Павловский и Баболовский, характеризуется как переходный от морского к континентальному. Остальные ППП находятся на берегу Финского залива. Здесь влияние воздушных масс Балтийского моря формирует умеренный морской климат с несколько более мягкими температурами в зимний период и умеренно теплым летом.

На каждой ППП были промаркированы и учтены от 70 до 100 деревьев одной породы (табл. 3). Для оценки их состояния использовали стандартную шестибалльную шкалу¹, по которой к первой категории относят здоровые деревья, а к шестой – старый сухостой. Средний балл состояния рассчитывался как средневзвешенный².

На каждой пробной площади сделали количественные оценки воздействия различных факторов, которые могут оказывать негативное воздействие на состояние древостоев.

Анализ почвы проводили на базе Испытательной лаборатории Филиала ФГБУ «Россельхозцентр» по Ленинградской области (регистрационный № Росс RU DC 1.6.1.047 934.04ШР0 от 13 мая 2015 г.). Глубина отбора почв составляла до 20 см. Исследование структуры и химического состава почв проводили стандартными методами [2] в трехкратной повторности. Гранулометрический состав определяли по ГОСТ 12536-79, количество органического вещества – по ГОСТ 26213-91 (определение органического вещества по методу Тюрина в модификации ЦИНАО, гравиметрический метод определения массовой доли органического вещества), кислотность почвы – по ГОСТ 26484-85; подвижные соединения фосфора и калия – по ГОСТ Р 54650-2011; ГОСТ 26205-91; степень окультуренности почвы – по Благовидову [3]. Оценку загрязнения токсичными солями делали по результатам

¹ «Правила санитарной безопасности в лесах», утвержденные Постановлением Правительства РФ от 20 мая 2017 г.

² Распоряжение Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга от 30 августа 2007 г. № 90-р «Об утверждении Методики оценки экологического состояния зеленых насаждений общего пользования Санкт-Петербурга».



Рис. 1. Схема расположения объектов исследования

Табл. 1

Характеристика пробных площадей с преобладанием сосны

№ ППП	Местоположение	Число деревьев	Тип леса и состав древостоя	Подрост/подлесок	Класс бонитета	Класс возраста/полнота
1	СПб, парк Сосновка	74	Групповая посадка, 10С	–	II	VI/–
5	СПб, парк Сосновка	92	Сосняк-черничник, 8С2Е + Ос	–/рябина, крушина	III–IV	V/0,7
2	Выборг, парк Монрепо	71	Сосняк-черничник, 7С3Е + Б	–/рябина (ед.)	III	V/0,5
3	СПб, лесничество Молодежное	80	Сосняк-черничник, 10С	Ель/–	III	V/0,8
4	СПб, Павловский парк	92	Аллеяная посадка 10С	–	I	Свыше VIII/–
6	г. Нарва-Йыэсуу, лесопарк	98	Сосняк липняковый, 9С1Кл	Сосна (ед.) липа/жимолюсть	II	V/0,5
7	г. Нарва-Йыэсуу, лесопарк	78	Сосняк лишайниково-мшистый, 10С + Е	Ель (ед.)/–	III	VI/0,6

Примечание: ед. – единично.

Характеристика пробных площадей с преобладанием ели

№ ППП	Местоположение	Число деревьев	Тип леса/состав древостоя	Подрост/подлесок	Класс бонитета	Класс возраста/полнота
8	СПб, Баболовский парк	71	Ельник-черничник. 7ЕЗБ	Ель, береза/рябина	III	VI/0,7
9	Выборг, парк Монрепо	78	Ельник-кисличник, 8Е2С + Б	-/рябина (ед.)	II	VII/0,6
10	СПб, лесничество Молодежное	100	Ельник-черничник, 10Е + С	Ель/рябина	III	VI/0,8
11	СПб, Павловский парк	73	Ельник-кисличник, 8Е2С + Б	-/рябина (ед.)	II	VI/0,6

Примечание: ед. – единично.

анализа ионного состава водной вытяжки почвы – по ГОСТ 26423-85. Для определения степени засоления почв использовали метод, основанный на определении суммарного эффекта влияния токсичных ионов, – ГОСТ 17.5.4.02-84, ГОСТ 26426-85, ГОСТ 26490-85 с расчетом показателя суммы токсичных солей. Расчет токсичных и нетоксичных солей основан на связывании ионов в определенной последовательности в гипотетические соли, начиная с менее растворимых солей к более растворимым. Полученное количество мг-экв. ионов токсичных солей переводят в проценты, перемножив его на соответствующий для каждого иона коэффициент. Найденные проценты суммируются, после чего определяется массовая доля токсичных солей от массы исследуемой пробы, выраженная в %.

Гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК) рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{\sum p}{\sum t} \times 10,$$

где $\sum p$ – сумма осадков за вегетационный период (мм); $\sum t$ – сумма среднесуточных положительных температур за вегетационный период (°C).

Рекреационную нагрузку определяли по шкале рекреационных дигрессий, предложенной Н.С. Казанской [7]. Первой стадии дигрессии соответствуют экосистемы, в которых деятельность человека не повлияла на состояние лесной подстилки и живого напочвенного покрова; на второй стадии отмечаются незначительные повреждения; на третьей дорожно-тропиночная сеть плотная, нарушены процессы естественного возобновления леса, в видовом составе травянистой растительности появляются луговые и рудеральные группировки; на четвертой стадии имеется значительное уплотнение почвы и вытаптыва-

ние лесной подстилки, сеть дорог и троп густая, жизнеспособного подроста нет; на пятой – напочвенный покров и лесная подстилка полностью отсутствуют, в составе травянистой растительности лесные виды не представлены.

В период активного посещения территорий, на которых находились пробные площади (май-октябрь 2017 г.), в дневные часы (с 12:00 до 13:00) в выходной (воскресенье) и будний (среда) дни производили подсчет посетителей. Подсчитывали количество механических повреждений деревьев (зарубки, ожоги на стволах, заломы ветвей и пр.), определяли проективное покрытие дорожно-тропиночной сетью, загрязненность территории бытовыми отходами. Также оценивали состояние подроста, подлеска, напочвенного покрова, исследовали видовое разнообразие травянистой растительности. После анализа данных определяли уровень рекреационной нагрузки и стадии дигрессии территории.

Для оценки общего фитосанитарного состояния деревьев и выявления очагов наиболее опасных заболеваний проводили регулярные рекогносцировочные обследования территории пробных площадей. Отмечали участки с нарушенной устойчивостью, где значительная часть деревьев имела признаки ослабления (механические повреждения коры деревьев антропогенного характера, морозобойные трещины, попытки заселения стволовыми вредителями, дупла, сухобочины...).

При определении состояния деревьев на пробных площадях выявляли признаки заболеваний и, по возможности, их возбудителей. Для уточнения видов патогенов привлекали специалистов кафедры защиты леса, лесоведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, а также сотрудников отдела Защиты растений Филиала ФГБУ «Россель-

хозцентр» по Ленинградской области. Определяли степень и характер распространения выявленных заболеваний.

Видовой состав вредителей определяли по повреждениям, личинкам и имаго. Значимыми вредителями на исследуемых объектах были только стволовые насекомые. Оценку плотности популяций проводили по количеству заселенных деревьев, входных и летных отверстий, а также по количеству маточных ходов и брачных камер на стволах деревьев [13]. Поскольку основными вредителями были виды, заселявшие нижнюю часть ствола, для подсчета этих показателей брали круговые палетки на высоте груди. Кроме того, учет численности сосновых лубоедов проводили по количеству опавших побегов, поврежденных при дополнительном питании вредителя.

Для количественной оценки влияния различных природных и антропогенных факторов на состояние древостоев сосны и ели применяли методы корреляционного, дисперсионного и регрессионного анализа, которые традиционно используются для решения такого рода задач. В качестве программного обеспечения использовали пакет STATISTICA ver. 10.

Результаты

Количественные характеристики и их предварительный анализ

Усредненные баллы оценки состояния древостоев по годам исследования приведены в табл. 3, где ППП расположены в порядке убывания различий между первым и последним годами исследования (гради-

ент ухудшения). На ППП с сосновыми древостоями некоторое ухудшение их состояния отмечено в парках Сосновка, Павловском, Монрепо и в лесничестве Молодежное. На ППП с древостоями ели их состояние ухудшилось в Баболовском парке, парке Монрепо и лесничестве Молодежное. При этом в парке Сосновка и Баболовском градиент ухудшения был в несколько раз больше, чем на других ППП (табл. 3), но только в Баболовском парке насаждение можно характеризовать как ослабленное. Следует отметить, что пробная площадь там расположена в глубине массива парка, слабо посещается населением, и мероприятия по уходу за насаждением в этой части парка не проводятся. ППП 1 в парке Сосновка, напротив, расположена на окраине парка рядом с автомагистралью и испытывает высокие рекреационные и техногенные нагрузки.

Концентрации различных веществ в почве на пробных площадях в сопоставлении с градиентом индекса состояния насаждений приведены в табл. 4. Увеличению градиента ухудшения состояния соответствует увеличение концентрации ионов натрия, хлора, магния и кальция.

Степень окультуренности почв варьировала от слабой до средней. Гранулометрический состав почв варьировал от свойственного рыхлому песку до свойственного легкому суглинку. Соответствия градиенту состояния древостоев у обоих этих показателей не заметны. Также нет такого соответствия у динамики метеоклиматических данных, в том числе гидротермического коэффициента, и у сумм температур и осадков за вегетационный сезон (табл. 5 и 6). Не

Табл. 3

Динамика балльных оценок состояния древостоев по годам

№ ППП	Год				Градиент (2015–2018)
	2015	2016	2017	2018	
Сосна					
1. Сосновка	1,15	1,28	1,32	1,34	0,19
2. Монрепо	1,29	1,35	1,35	1,38	0,09
3. Молодежное	1,15	1,21	1,21	1,24	0,09
4. Павловск	1,23	1,27	1,3	1,3	0,07
5. Сосновка	1,03	1,07	1,08	1,08	0,05
6. Нарва	1,05	1,06	1,06	1,06	0,01
7. Нарва	1,04	1,04	1,04	1,04	0,00
Ель					
8. Баболовский парк	1,87	1,96	2,17	2,19	0,32
9. Монрепо	1,09	1,09	1,16	1,22	0,13
10. Молодежное	1,22	1,26	1,27	1,27	0,05
11. Павловск	1,05	1,05	1,06	1,06	0,01

Табл. 4

**Концентрации различных веществ в почве на пробных площадях
в порядке уменьшения градиента индекса состояния древостоев**

№ ППП	Градиент	рН КСІ	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	Органическое вещество (%)	Ионы, ммоль/100 г						Сумма токсичных солей, %
						Na ⁺	Cl ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
Сосна												
1	0,19	4,1	105 ± 21,0	71,2 ± 14,2	22,2 ± 9,2	0,26	0,5	1,20	1,10	0,10	0,2	0,041
2	0,09	3,4	59,8 ± 12,0	224,0 ± 34,0	44,0 ± 6,7	0,13	0,6	0,50	0,75	0,30	0,2	0,034
3	0,09	3,9	58,5 ± 11,7	24,2 ± 4,8	4,1 ± 0,5	0,12	0,3	0,38	0,38	0,15	0,1	0,032
4	0,07	4,2	34,5 ± 6,9	65,3 ± 13,1	17,1 ± 9,9	0,16	0,4	0,25	0,25	0,15	0,2	0,031
5	0,05	4,6	122,0 ± 25,0	97,7 ± 14,7	8,5 ± 0,9	0,15	0,3	0,50	0,75	0,15	0,1	0,019
6	0,01	5,5	129,0 ± 26,0	190,0 ± 29,0	16,3 ± 9,9	0,12	0,3	0,29	0,38	0,12	0,2	0,020
7	0,00	5,6	644,0 ± 129,0	206,0 ± 31,0	6,9 ± 0,5	0,13	0,3	0,32	0,38	0,16	0,1	0,019
Ель												
8	0,32	3,1	199,0 ± 40,0	47,1 ± 9,4	87,2 ± 1,5	0,39	0,6	1,50	1,50	0,20	0,3	0,050
9	0,13	4,5	170,0 ± 35,0	318,0 ± 52,0	5,2 ± 0,5	0,17	0,3	0,38	0,38	0,15	0,4	0,029
10	0,05	3,6	12,9 ± 4,5	28,0 ± 5,6	6,3 ± 0,5	0,14	0,3	0,25	0,38	0,15	0,2	0,033
11	0,01	4,9	171,0 ± 34,0	94,0 ± 40,0	31,9 ± 8,1	0,13	0,3	0,38	0,38	0,10	0,1	0,020

Примечание: знаком «±» обозначаются пределы относительной погрешности и допускаемые относительные отклонения результатов измерений в соответствии с нормативной документацией используемых методов.

просматриваются связи градиента индекса состояния древостоев со стадиями рекреационной дигрессии насаждений и с поражением вредителями и болезнями (табл. 5).

Следует отметить, что на ППП 8, расположенной в глубине Баболовского парка и подвергающейся минимальным рекреационным нагрузкам, отмечен наибольший градиент ухудшения состояния еловых насаждений и высокий уровень активности вредителей и болезней. На этой пробной площади 29% деревьев поражено язвенным раком, корневой губкой и окаймленным трутовиком, тогда как доля поврежденных деревьев на других пробах не превышает 9%.

Проанализировать зависимость собственно индекса состояния насаждений (табл. 3), а не градиента, от приведенных характеристик (табл. 4–6) путем простого сопоставления показателей не представляется возможным ввиду большого объема разнородных данных.

Для дальнейшего анализа полученных данных последовательно использовали дисперсионный и регрессионный анализы. Множественный регрессионный анализ применить не удалось, так как анализируемые факторы сильно коррелируют один с другим, и в некоторых случаях даже одни факторы оказались линейной комбинацией других. Поэтому влияние

каждого из них изучалось отдельно с помощью однофакторного дисперсионного анализа.

В результате анализа не были найдены статистически значимые связи между метеоклиматическими условиями, вредителями, болезнями, состоянием почв и стадиями рекреационной дигрессии, с одной стороны, и состоянием древостоев сосны и ели – с другой. Установлено наличие сильной положительной корреляции состояния древостоев с суммой токсичных солей и отрицательной корреляции – с уровнем кислотности почвы. Наличие в почвах токсичных ионов натрия, хлора, магния, кальция, гидрокарбоната и сульфат-иона сильно коррелирует с величиной суммы токсичных солей. Последняя также имеет сильную отрицательную корреляционную связь с рН почвы, то есть при увеличении кислотности состояние насаждений ухудшается.

В табл. 7 и на рис. 2, 3 и 4 представлена динамика средних значений балла состояния древостоев с интервалами наименьших существенных различий и результаты регрессионного анализа влияния суммы токсичных солей и кислотности почв на состояние древостоев сосны.

Данные табл. 7 показывают статистически достоверное влияние загрязнения почв токсичными солями на состояние древостоев сосны обыкновенной.

Табл. 5

Гидротермический коэффициент, рекреационная дигрессия и степень поражения вредителями и болезнями насаждений на пробных площадях в соответствии с градиентом индекса состояния насаждений

№ ППП	Градиент	Гидротермический коэффициент по годам				Число посетителей за 1 час	Стадия рекреационной дигрессии	Степень поражения	
		2015	2016	2017	2018			болезнями	вредителями
Сосна									
1	0,19	1,04	1,83	2,07	1	20–25	4	+	+
2	0,09	1,42	1,53	1,72	1,07	25–30	5	–	+
3	0,09	1,11	2,23	2,02	1,01	Менее 3	1	–	+
4	0,07	1,12	2,29	2,15	0,98	10–15	3	–	–
5	0,05	1,04	1,83	2,07	1	5–10	2,5	–	–
6	0,01	1,15	2,75	2,76	1,24	5–10	2,5	–	–
7	0	1,15	2,75	2,76	1,24	15–20	4	–	–
Ель									
8	0,32	1,12	2,29	2,15	0,98	Менее 3	1	++	+++
9	0,13	1,42	1,53	1,72	1,07	65–70	5	–	+
10	0,05	1,11	2,23	2,02	1,01	Менее 5	1	–	+
11	0,01	1,12	2,29	2,15	0,98	15–20	4	+	–

Табл. 6

Сумма температур и осадков за вегетационный сезон на пробных площадях в насаждениях сосны и ели по годам

№ ППП	Суммарная температура, °С					Суммарные осадки, мм				
	2015	2016	2017	2018	Норма	2015	2016	2017	2018	Норма
Сосна										
1	2160	2283	2024	2529	2270	229	418	420	253	343
2	1980	2070	2018	2382	2162	282	317	348	256	318
3	2019	2233	2150	2310	2170	224	499	435	233	326
4	2005	2180	2027	2529	2153	231	499	435	249	330
5	2160	2283	2024	2529	2270	229	418	420	253	343
6	2087	2185	1994	2493	2210	241	600	550	309	329
7	2087	2185	1994	2493	2210	241	600	550	309	329
Ель										
8	2005	2180	2027	2529	2153	231	499	435	249	330
9	1980	2070	2018	2382	2162	282	317	348	256	318
10	2019	2233	2150	2310	2170	224	499	435	233	326
11	2005	2180	2027	2529	2153	231	499	435	249	330

Табл. 7

Результаты дисперсионного анализа влияния загрязнения почвы токсичными солями на состояние древостоев сосны обыкновенной

Источник изменчивости	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат отклонений	F-критерий	P-значение
Между группами	0,368036	5	0,0736071	44,06	0,0000
Внутри групп	0,03675	22	0,00167045		
Всего	0,404786	27			

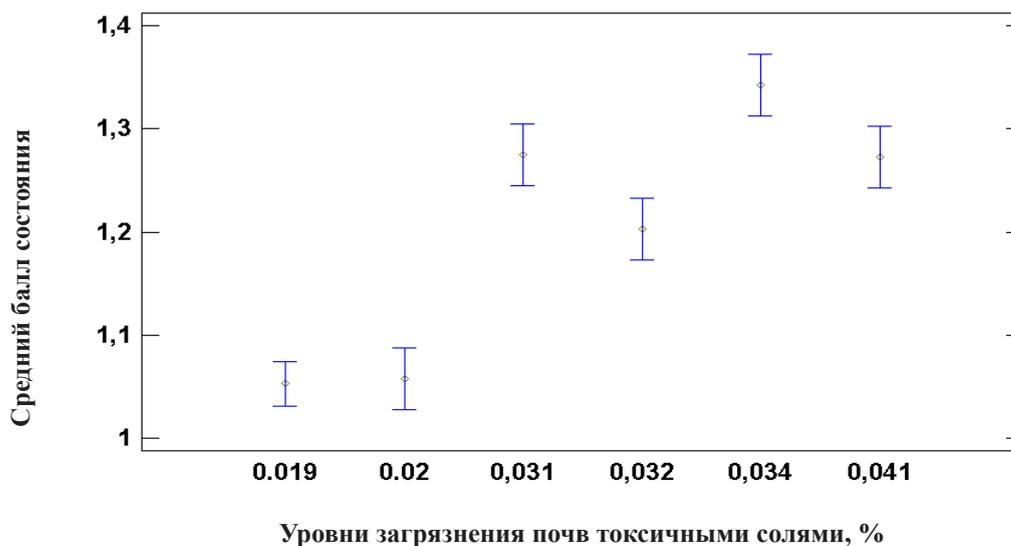


Рис. 2. Средние значения балла состояния древостоев сосны обыкновенной и интервалы наименьших существенных различий (LSD, при P ≥ 95%)

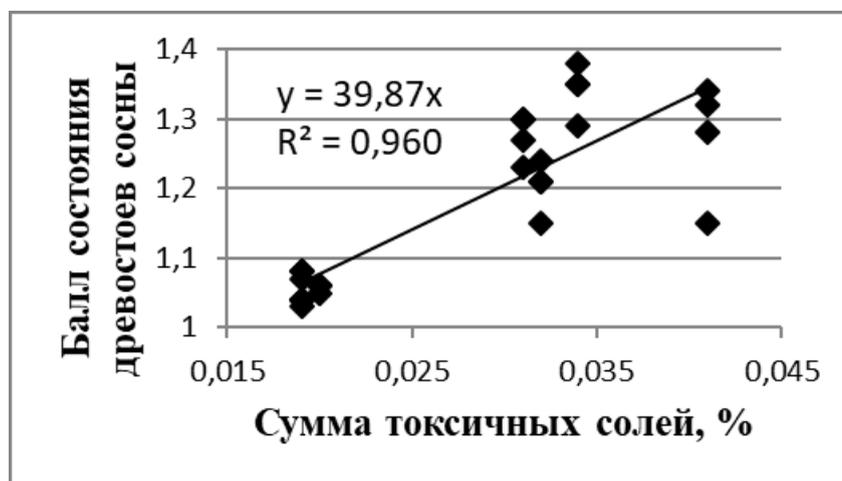


Рис. 3. Зависимость состояния древостоев сосны от загрязнения почв токсичными солями

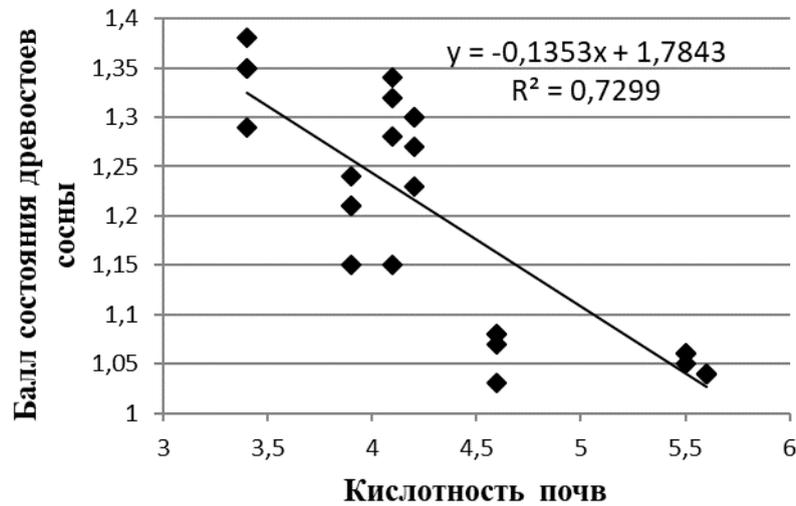


Рис. 4. Зависимость состояния древостоев сосны от кислотности почв

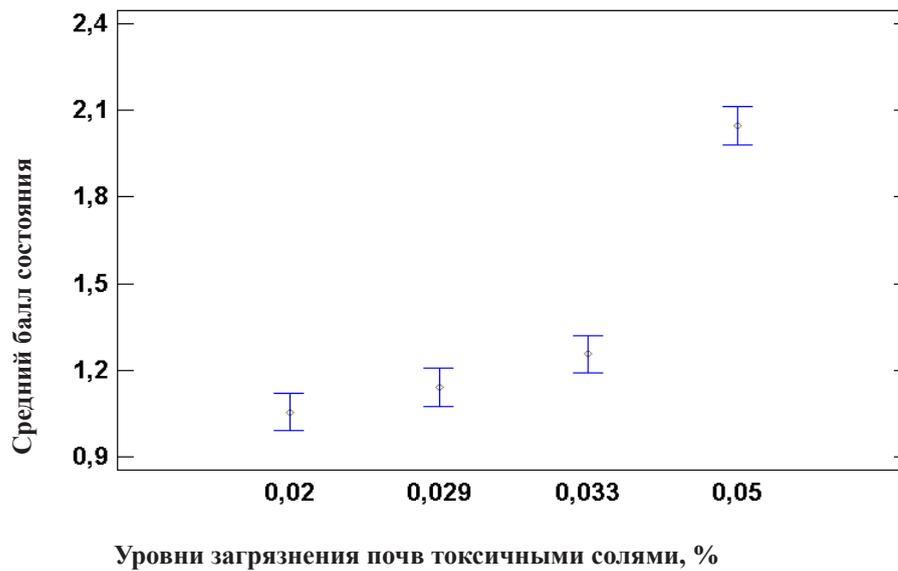


Рис. 5. Средние значения балла состояния древостоев ели европейской и 95% интервалы наименьших существенных различий (LSD, при $P \geq 95\%$)

Коэффициент детерминации линейной зависимости составляет 0,96 (рис. 3), и это говорит о том, что 96% изменчивости баллов состояния древостоев сосны на 7 пробных площадях с 2015 по 2018 г. определяется загрязнением почв токсичными солями. Доля влияния всех остальных факторов на жизненное состояние древостоев сосны составляет 4%.

Состояние древостоев сосны достоверно зависит также и от кислотности почв.

Множественный регрессионный анализ совместного действия этих двух основных факторов на состоя-

ние древостоев сосны показывает, что они определяют 99,2% изменчивости состояния древостоев.

$$y = 23,8434x_1 + 0,113048x_2, R^2 = 99,2\%,$$

где y – балл состояния древостоев сосны; x_1 – сумма токсичных солей (%); x_2 – кислотность почв. Причем фактор «сумма токсичных солей» определяет состояние древостоев на 96%, «кислотность» – на 3,2%.

В ионном составе водной вытяжки обследуемых почв наибольшее негативное влияние на состояние древостоев сосны оказывают ионы хлора.

В табл. 8 и на рис. 5–7 представлена динамика средних значений балла состояния с интервалами наименьших существенных различий и результаты дисперсионного анализа влияния суммы токсичных солей на состояние древостоев ели. Установлена высокая статистическая достоверность влияния загрязнения почв токсичными солями на состояние древостоев ели европейской (табл. 8).

Коэффициент детерминации линейной зависимости составляет 0,989, и это говорит о том, что 98,9% изменчивости баллов состояния древостоев ели на 4 пробных площадях с 2015 по 2018 г. определяется загрязнением почв токсичными солями. Доля влияния всех остальных факторов на жизненное состояние древостоев ели составляет 1,1%.

Множественный регрессионный анализ совместного действия этих двух основных факторов на состояние древостоев ели европейской показывает, что совместно они определяют 99,1% изменчивости состояния древостоев.

$$y = 36,86x_1 + 0,040x_2, R^2 = 99,1\%$$

где y – балл состояния древостоев ели; x_1 – сумма токсичных солей (%); x_2 – кислотность почв. Причем фактор «сумма токсичных солей» определяет состояние древостоев ели почти на 99%, кислотность почв влияет достоверно, но очень слабо.

Множественный регрессионный анализ в том случае, когда имеется сильная корреляция между величинами объясняющих переменных, требует дополнительного обоснования, так как наличие такой корреляции является признаком мультиколлениарности, которая имеет своим следствием недостоверность оценок регрессионных коэффициентов. Для проверки наличия и существенности мультиколлениарности вычисляется специальный показатель – фактор увеличения дисперсии (variance inflation factor) VIF, который в наших случаях равен для сосны – 5,9, для ели – 4,7, что ниже порогового значения, обычно принимаемого равным 10 (иногда 5). Таким образом, в нашем случае мультиколлениарность

Табл. 8

Результаты дисперсионного анализа влияния загрязнения почвы токсичными солями на состояние древостоев ели европейской

Источник изменчивости	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат отклонений	F- критерий	P-значение
Между группами	2,49712	3	0,832373	113,41	0,0000
Внутри групп	0,088075	12	0,00733958		
Всего	2,58519	15			

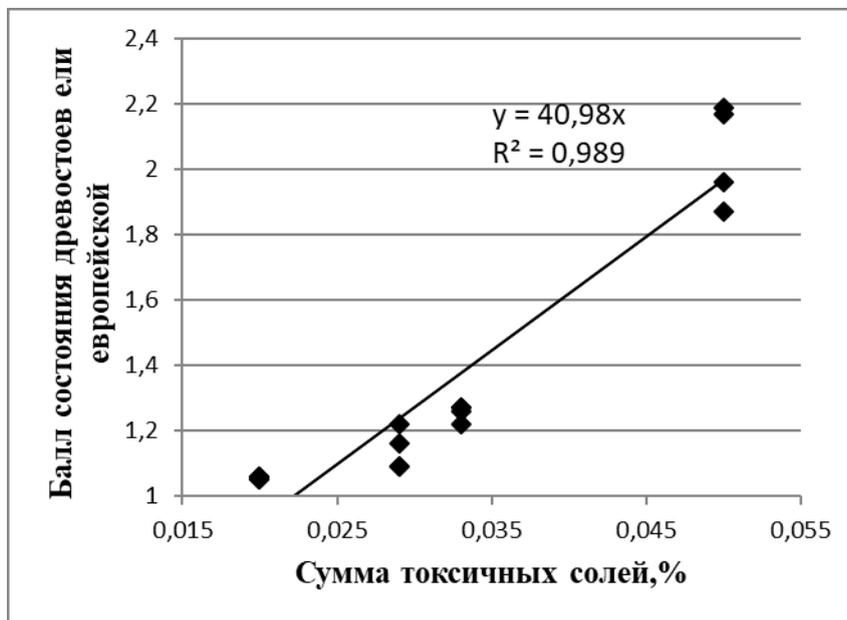


Рис. 6. Зависимость состояния древостоев ели европейской от загрязнения почв токсичными солями

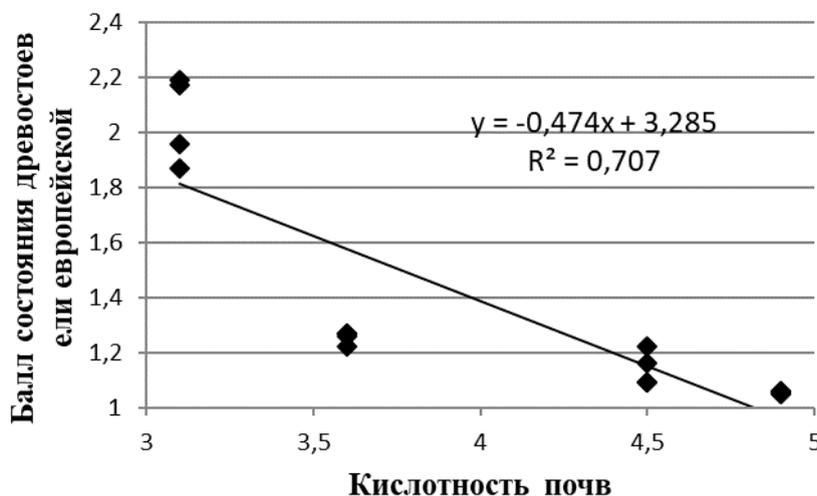


Рис. 7. Зависимость состояния древостоев ели европейской от кислотности почв

Табл. 9

Пороговые величины загрязнения почв токсичными солями для насаждений сосны и ели

Порода	Уровень загрязнения					
	Предельно допустимый (балл состояния 1,5)			Летальный (балл состояния 5,0)		
	минимальный	средний	максимальный	минимальный	средний	максимальный
Сосна	0,036	0,038	0,039	0,121	0,125	0,131
Ель	0,036	0,037	0,038	0,119	0,122	0,125

между скоррелированными объясняющими переменными может считаться несущественной, и результаты регрессионного анализа являются достоверными для решения поставленной задачи – определения основного действующего фактора из двух претендентов «сумма токсичных солей» и «кислотность почв». Ведущим фактором, как показал множественный регрессионный анализ, является «сумма токсичных солей», то есть более сильный фактор частично «поглотил» действие менее сильного, но не исключил его достоверное влияние на состояние древостоев хвойных пород.

Так же как и для насаждений сосны, содержание органического вещества, фосфора и калия в почве не связано с жизненным состоянием древостоев ели; концентрация ионов натрия, хлора, магния, кальция, гидрокарбоната и сульфат-иона сильно коррелирует с величиной суммы токсичных солей, которая в свою очередь имеет сильную отрицательную корреляционную связь со значением pH почвы.

Наиболее сильное влияние на состояние насаждений ели оказывает концентрация ионов хлора, как имеющих наиболее сильную корреляцию с фактором «сумма токсичных солей».

Учитывая определяющее влияние на состояние древостоев сосны обыкновенной и ели европейской загрязнения почв токсичными солями, в дальнейшем анализе мы рассматриваем только эти зависимости.

Регрессионные зависимости состояния древостоев сосны и ели от загрязнения почв токсичными солями имеют следующий вид:

$$y = a \times x.$$

Коэффициент *a* показывает, насколько изменится (ухудшится) средний балл состояния древостоев при увеличении загрязнения почв *x* на единицу.

Таким образом, коэффициенты регрессионных зависимостей состояния древостоев сосны и ели от загрязнения почв токсичными солями характеризуют их чувствительность к загрязнению почв. У сосны этот

регрессионный коэффициент равен $39,87 \pm 1,56$, у ели $40,98 \pm 1,11$, отсюда следует, что рассматриваемые насаждения ели и сосны примерно одинаково реагируют на загрязнение почв.

Полученные регрессионные уравнения могут быть использованы для прогнозов состояния древостоев сосны и ели в зависимости от загрязнения почв для двух уровней – летального и предельно допустимого.

Результаты таких расчетов с учетом стандартных ошибок регрессионных коэффициентов представлены в табл. 9.

В целом, различие пороговых значений загрязнения почв токсичными солями между анализируемыми породами невелико. Малы и стандартные ошибки регрессионных коэффициентов, минимальные и максимальные значения пороговых величин загрязнений почв различаются незначительно (табл. 9). В связи с этим в качестве нормативов можно обоснованно использовать средние величины пороговых значений. Полученные величины нормативов предельно допустимого и летального загрязнений почв могут быть использованы для мониторинга и прогнозирования состояния древостоев сосны обыкновенной и ели европейской и, соответственно, принятия своевременных мер, направленных на улучшение состояния древостоев.

Обсуждение и выводы

Результаты статистического анализа показывают, что среди исследуемых характеристик почвы пробных площадей наиболее тесные взаимосвязи состояния насаждений как сосны, так и ели наблюдаются с концентрацией в почве токсичных солей. С этими показателями, в свою очередь, коррелируют концентрации ионов натрия, хлора, магния, кальция, гидрокарбоната и сульфат-иона. Наиболее сильная корреляционная связь состояния насаждений ели отмечается с концентрацией ионов хлора.

Максимальный балл состояния и наибольший градиент ослабления наблюдались на пробных площадях в парке Сосновка (ППП № 1, сосна) и в Баболовском парке (ППП № 8, ель). Здесь выявлено максимальное, по сравнению с другими участками, содержание токсичных солей. Установленные значения засоления не являются пороговыми и не позволяют отнести эти почвы к засоленным [2]. Однако весьма вероятно, с учетом установленных корреляционных связей между содержанием солей в почве и состоянием насаждений, что такое содержание солей оказывает негативное влияние на состояние насаждений. При этом нельзя исключить и влияние других негативных факторов. В частности, на пробной площади в Баболовском парке выявлено максимальное распространение болезней и вредителей. С учетом местоположения этого участка можно предположить его техногенное загрязнение

другими веществами, которые не были учтены при проведении анализов, например, солями тяжелых металлов. Основными источниками такого загрязнения могут являться стоки с возвышенности, расположенной к северо-западу от Баболовского парка в районе совхоза Шушары (этот участок ранее интенсивно использовался для захоронений промышленных отходов; сейчас там расположен Экспоцентр, ведется интенсивное жилищное строительство) и из района коттеджного поселка Александровское, где раньше находились земли сельхозпользования. Также на расстоянии не более 10 км от объекта длительное время (в течение 45 лет) функционировал полигон ТБО «Южный», где неоднократно были зафиксированы возгорания. Стоками органических веществ с земель сельхозпользования и свалок, усилившимися в процессе жилищного строительства и промышленного освоения этих территорий, может объясняться и относительно высокое содержание органических веществ в почве на пробах 2, 11 и 8 (табл. 4).

Участок в «Сосновке», где также наблюдалась максимальная концентрация токсичных солей, подвергается повышенным рекреационным нагрузкам. Кроме того, непосредственная близость этой пробной площади к автодороге с интенсивным движением неизбежно ведет к увеличению концентрации в воздухе и почве токсичных элементов (тяжелых металлов, диоксидов углерода и серы, альдегидов и пр.), концентрацию которых в данном исследовании мы не определяли.

Было установлено также наличие достоверной связи ухудшения состояния насаждений с увеличением уровня кислотности почвы. Наименее здоровые еловые древостои Баболовского парка произрастали на сильнокислых почвах (рН 3,1). Оптимальны для ели европейской и сосны обыкновенной значения рН от 5,5 до 7,5 [6]. Кроме того, при рН < 4,5 создаются благоприятные условия для развития грибных инфекций [14], что и происходит в еловых насаждениях исследуемой части Баболовского парка.

Таким образом, полученные данные позволяют предположить, что ухудшение состояния обследуемых древостоев определяется несколькими факторами. Среди учтенных экологических факторов оказывает негативное воздействие увеличение содержания токсичных солей в почве и повышение уровня кислотности почвы. Сопутствующими факторами, действие которых достоверно проявляется на пробных площадях с наибольшей концентрацией токсичных солей, являются рекреационные нагрузки и деятельность вредителей и патогенов. Кроме того, весьма вероятно наличие неучтенных факторов, в частности загрязнение тяжелыми металлами или другими техногенными веществами, концентрации которых не определялись в ходе настоящего исследования.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Алексеев АС. Мониторинг лесных экосистем. СПб.: Изд-во СПбЛТА; 2003.
2. Аринушкина ЕВ. Руководство по химическому анализу почв. М.: Издательство МГУ; 1970.
3. Благовидов НЛ. Природные условия и качественная оценка земель северо-западной зоны РСФСР. В кн.: Система ведения сельского хозяйства северо-западной зоны РСФСР Л.: Колос; 1968. С. 31-63.
4. Гласова НВ. Антропогенная трансформация пригородных ельников: Автореф. дисс. ... канд. сельхоз. наук. Архангельск; 2006.
5. Грязькин АВ, Смертин ВН, Петрик ВВ. Динамика структуры и состояния парковых фитоценозов в условиях интенсивной рекреации. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова; 2015.
6. Иванов АФ. Рост древесных растений и кислотность почвы. Минск: Наука и техника; 1970.
7. Казанская НС, Ланина ВВ, Марфенин НН. Рекреационные леса. М.: Лесная промышленность; 1977.
8. Кулагин ЮЗ. Лесообразующие виды, техногенез и прогнозирование. М.; 1980.
9. Кулагин ЮЗ. Древесные растения и промышленная среда. М.: Наука; 1974.
10. Лукина НВ, Никонов ВВ. Биогеохимические циклы в лесах севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Ч. 2. Апатиты: Кольский научный центр РАН; 1996.
11. Маслов АД. Интегрированная оценка состояния деревьев. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009;(187):185-92.
12. Маслов АД. Методические рекомендации по надзору, учету и прогнозу массовых размножений стволовых вредителей и санитарного состояния лесов. Пушкино. МПР, ВНИИЛМ; 2006.
13. Мощеникова НБ. Оценка экологического состояния зеленых насаждений Санкт-Петербурга. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.; 2011.
14. Небольсин АН, Небольсина ЗП. Известкование почв (результаты 50-летних полевых опытов). СПб.: ГНУ ЛНИИСХ Россельхозакадемии, 2010.
15. Полякова ГА, Малышева ТВ, Флеров АА. Антропогенное влияние на сосновые леса Подмосквы. М.: Наука; 1981.
16. Прохоров ВП. Исследование резистентности сосновых насаждений Карельского перешейка в различных условиях рекреационной нагрузки. Автореф. дисс. ... канд. сельхоз наук. Л.; 1977.
17. Селиховкин АВ. Количественная оценка воздействия насекомых-дендрофагов на состояние древостоев. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009;(187):285-96.
18. Селиховкин АВ, Поповичев БГ. Возможность количественной оценки воздействия катастрофических факторов на лесные экосистемы. Биосфера. 2016;8(2):170-7.
19. Слепян ЭИ. Химические средства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве и лесном строительстве и проблема нарушения и восстановления экологических систем. В кн.: Охрана природы и применение химических средств в сельском и лесном хозяйстве. Л.: Наука; 1981. С. 5-34.
20. Слепян ЭИ. Система патогенных факторов, факторов риска и патотропных ситуаций в аспекте естественно-научной картины Мира. В кн.: Биологическая индикация в антропоэкологии: Материалы 2 Всесоюзного совещания по космической антропоэкологии. Ленинград, 2-6 июня 1984. Л.; 1984. С. 6-62.
21. Спурр СГ, Барнес БВ. Лесная экология. М.: Лесная промышленность; 1984.
22. Трешоу М. (ред.) Загрязнение воздуха и жизнь растений. Л.: Гидрометеиздат; 1988.
23. Ходачек ОА, Селиховкин АВ. Количественная оценка воздействия стрессовых факторов на лесные экосистемы: методика и объекты. В кн.: Мусолина ДЛ, Селиховкин АВ. – ред. IX Чтения памяти О.А. Катаева. Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах. Материалы международной конференции, Санкт-Петербург, 23–25 ноября 2016 г. СПб.: СПбГЛТУ; 2016. С. 113.

Общий список литературы/Reference List

1. Alekseyev AS. Monitoring Lesnykh Ecosystem. Saint Petersburg: Izdatelstvo SPbLTA; 2003. (In Russ.)
2. Arinushkina YeV. Rukovodstvo po Khimicheskomu Analizu Pochv. Moscow: MGU; 1970. (In Russ.)
3. Blagovidov NL. [Natural conditions and qualitative assessment of land areas in the Northwest of the Russian Federation]. In: Sistema Vedeniya Selskogo Khozaistva Severo-Zapadnoy Zony RSFSR. Leningrad: Kolos; 1968. P. 31-61. (In Russ.)

4. Glasova NV. Antropogennaya Transformatsiya Prigorodnykh Yelnikov. Candidate of Agricultural Sciences Theses. Arkhangelsk; 2006. (In Russ.)
5. Gryazkin AV, Smertin VN, Petrik VV. Dinamika Struktury i Sostoyaniya Parkovykh Fitotsenozov v Usloviyakh Intensivnoy Rekreatsii. Arkhangelsk: Severnyy (Arkticheskiy) Federalny Universitet imeni M.V. Lomonosova; 2015. (In Russ.)
6. Ivanov AF. Rost Drevesnykh Rasteniy i Kislotnost Pochvy. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1970. (In Russ.)
7. Kazanskaya NS, Lanina VV, Marfenin NN. Rekreatsionnye Lesa. Moscow: Lesnaya promyshlennost; 1977. (In Russ.)
8. Kulagin YuZ. Lesoobrazuyushchiye Vidy, Tekhnogenez i Prognozirovaniye. Moscow; 1980. (In Russ.)
9. Kulagin YuZ. Drevesnye Rasteniya i Promyshlennaya Sreda. Moscow; 1974. (In Russ.)
10. Lukina NV, Nikonov BB. Biogeokhimicheskiye Tsykly v Lesakh Severa v Usloviyakh Aerotekhnogenogo Zagryazneniya. Apatity: Kolskiy Nauchnyi Tsentr RAN; 1996.
11. Maslov AD. [Integrated assessment of trees]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii. 2009;(187):185-92. (In Russ.)
12. Maslov AD. Metodicheskiye rekomendatsii po nadzoru, uchetu i prognozu massovogo raznozheniya stvolovykh vrediteley i sanitarnogo sostoyaniya lesov. Pushkino. MPR, VNIILM; 2006. (In Russ.)
13. Moshchenikova NB. Otsenka Ekologicheskogo Sostoyaniya Zelenykh Nasazhdeniy Sankt-Peterburga. Candidate of Biological Sciences Theses. Moscow; 2011. (In Russ.)
14. Nebolsin AN, Nebolsina ZP. Izvestkovaniye Pochv (Rezultaty 50-Letnikh Polevykh Opytov). Saint Petersburg: GNU LNIISKh Rosselkhozakademii; 2010. (In Russ.)
15. Polyakova GA, Malysheva TV, Flerov AA. Antropogennoye Vliyaniye na Sosnovye Lesa Podmoskovya. Moscow: Nauka; 1981. (In Russ.)
16. Prokhorov VP. Issledovaniye Rezistentnosti Sosnovykh Nasazhdeniy Karelskogo Peresheyka v Razlichnykh Usloviyakh Rekreatsionnoy Nagruzki. Candidate of Agricultural Sciences Theses. Leningrad; 1977. (In Russ.)
17. Selikhovkin AV. [Quantitative assessment of the effects of dendrophagous insects on forest health]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii. 2009;(187):285-96. (In Russ. English summary)
18. Selikhovkin AV, Popovichev BG. [On the possibility to assess quantitatively the impacts of catastrophic factors on woodlands]. Biosfera. 2016;8(2):170-7. (In Russ. English summary)
19. Slepian EI. [Chemicals in agriculture, forestry, fisheries, and forest management and the problem of violation and restoration of ecological systems]. In: Okhrana Prirody i Primeneniye Khimicheskikh Sredstv v Selskom i Lesnom Khozyaystve. Leningrad: Nauka; 1981. P. 5-34. (In Russ.)
20. Slepian EI. [The system of pathogenic factors, risk factors and pathotropic situations in the aspect of the natural science picture of the World]. In: Biologicheskaya Indikatsiya v Antropoekologii: Materialy 2 Vsesoyuznogo Soveshchaniya po Kosmicheskoy Antropoekologii. Leningrad, June 2-6, 1984. Leningrad; 1984. P. 6-62. (In Russ.)
21. Spurr SG, Barnes BV. Lesnaya Ekologiya. [Forest Ecology]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost; 1984. (In Russ.)
22. Treshou M, ed. Zagryazneniye Vozdukh i Zhizn Rasteniy. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1988. (In Russ.)
23. Khodachek OA, Selikhovkin AV. [Quantitative assessment of the impact of stress factors on forest ecosystems: methods and objects]. In: Musolin DL, Selikhovkin AV. (Eds.). IX Katayev Memorial Readings Dendrobiotnye Bespozvonochnye Zhivotnye i Griby i Ikh Rol v Lesnykh Ekosistemakh. [Dendrobiotic Invertebrates and Fungi and their Role in Forest Ecosystems]. Saint Petersburg; SPbGLTU; 2016. P. 113. (In Russ.)

