

**ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ
НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ**

В статье рассмотрены морфометрические и биохимические особенности хвои сосны обыкновенной, продуцирующей в пригородных территориях, под влиянием промышленных выбросов г. Красноярск в сравнении с фоном. Получены биометрические характеристики хвои, определено содержание в ней фотосинтетических пигментов. Оценены показатели флуктуирующей асимметрии хвои (ФА). Выявлена начальная стадия антропогенной дегрессии сосновых насаждений в зоне влияния промышленности г. Красноярск.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, флуктуирующая асимметрия хвои, тяжелые металлы, хлорофилл, каротиноиды.

**L.N. Skripaltshikova, V.V. Stasova,
M.A. Plyashechnik**

**ECOLOGICAL STATE ASSESSMENT OF PINE IN KRASNOYARSK
FOREST-STEPPE URBANIZED TERRITORIES**

The needle morphometric and biochemical peculiarities of pine generating in the suburban territories, under the influence of Krasnoyarsk industrial emissions in comparison with the background are considered in the article. The needle biometric characteristics are received, the content of photosynthetic pigments in it is determined. The indices of needle fluctuating asymmetry (FA) are assessed. The anthropogenic degradation initial stage of pine plantations in the zone of Krasnoyarsk industry influence is revealed.

Key words: pine, needle fluctuating asymmetry, heavy metals, chlorophyll, carotenoids.

Введение. На территории г. Красноярск функционируют крупные промышленные предприятия, выбросы вредных веществ которых вызывают загрязнение почвы на значительных площадях по основному воздушному переносу. Среди стационарных объектов наиболее значительными источниками загрязнения как городской среды, так и пригорода, являются предприятия теплоэнергетики и Алюминиевый завод. В окружающую среду поступают более двадцати канцерогенных веществ, концентрации которых во много раз превышают предельно допустимые [5].

Сосна обыкновенная является одной из основных лесообразующих пород в Сибири. В пригородной зоне Красноярск сосновые насаждения занимают 105020 га [21], и большая их часть попадает под промышленное загрязнение.

В экспертных оценках экологического состояния территорий и отклика на стресс, вызванный масштабами техногенного загрязнения, широко используются морфологические показатели листового аппарата древесных растений и его физиолого-биохимические характеристики. Одним из методов морфологического подхода в оценке качества среды и экологического состояния биотических компонентов является оценка уровня флуктуирующей асимметрии (ФА) билатеральных морфологических признаков растений и животных. Стабильность развития, т.е. способность организма функционировать без отклонений от нормы, является чувствительным показателем состояния природных популяций. В свою очередь оценка ФА представляет собой корректный способ формализации степени этих отклонений. При выборе конкретного показателя, характеризующего ФА, не существует никаких ограничений – могут быть использованы как качественные, так и количественные показатели, включая меристические [7]. Под давлением стрессовых факторов происходит ослабление гомеостатических механизмов, что на морфологическом уровне выражается в повышении асимметрии листового аппарата [3].

Снижение содержания хлорофилла часто используют в качестве индикаторной реакции повреждения растения, происходящего под воздействием загрязняющих веществ. Хроническое воздействие даже небольших доз приводит к потере хлорофилла и снижению фотосинтеза [10]. Принципиальная возможность использования содержания фотосинтетических пигментов для целей индикации суммарного загрязнения окружающей среды показана в работах О.А. Неверовой [12, 13].

Цель исследований. Оценить экологическое состояние и устойчивость развития сосны обыкновенной, произрастающей в пригородах Красноярск в разных экологических условиях, на основе измерения флуктуирующей асимметрии хвои и содержания в ней основных фотосинтетических пигментов.

В процессе исследований определяли содержание валовых форм тяжелых металлов, хлорофиллов а, б, каротиноидов в образцах хвои.

Объекты и методы исследований. Исследования проводились на мониторинговых пробных площадях в нарушенных насаждениях Березовского и Есаульского боров, продуцирующих по основному переносу техногенных выбросов предприятий г. Красноярск и в условиях фона в Академгородке. Сосняки однородны по составу и возрасту, разнотравного типа, III класса бонитета, V класса возраста, средняя высота 23–26 м, диаметр 38–43 см. По лесопатологическому обследованию в зоне загрязнения произрастают сосняки ослабленные и сильно ослабленные [23], в условиях фона в Академгородке насаждения характеризуются как здоровые.

На каждой пробной площади в конце вегетационного периода осуществлялся сбор образцов хвои из нижней части кроны с пяти модельных деревьев. Индекс флуктуирующей асимметрии (ИФА) вычислялся по формуле [25, 26, 28]:

$$\text{ИФА} = 2 * (\text{WL} - \text{WR}) / (\text{WL} + \text{WR}),$$

где WL – длина одной хвоинки в паре;
WR – длина другой хвоинки в паре.

Анализ образцов хвои на содержание тяжелых металлов проводился на спектрометре «СПЕКТРОСКАН – МАКС G». Содержание хлорофиллов а, б, каротиноидов в образцах хвои сосны обыкновенной определялось фотометрическим способом после экстракции этанолом [4, 27]. Результаты исследований обрабатывались статистически [9, 16].

Результаты исследований и их обсуждение. Биологический мониторинг позволяет выявлять наличие синергических эффектов в среде и наиболее точно прогнозировать ее изменения. Наиболее важный и результативный элемент биологического мониторинга – растения, и особенно хвойные, отличающиеся высокой чувствительностью к повышенным концентрациям токсических веществ в окружающей среде [2, 12]. В фитоиндикационных методах наиболее простыми и доступными являются морфо- и биометрические. При использовании этих методов можно измерять длину хвои и возраст как наиболее чувствительные показатели, реагирующие на любые изменения среды обитания [24]. Известно, что длина хвои сосны может заметно варьировать в зависимости от индивидуальных особенностей произрастания того или иного дерева, а продолжительность жизни хвои сосны является надежным критерием для определения жизненного состояния конкретного дерева [1, 14].

В пригородных сосняках г. Красноярск максимальный возраст хвои 5 лет установлен в фоновых условиях, в "грязных" объектах возраст хвои снижается до 3 лет. На всех "грязных" объектах отмечены хлорозы и некрозы – до 90 % в Березовском бору и немного меньше в Есаульском, а также отсутствие таковых на фоновом объекте. Показатели ФА хвои на модельных деревьях в сосняке Академгородка варьируют от 0,005 до 0,008. В Есаульском бору в зоне прямого влияния выбросов алюминиевого производства отмечено уменьшение ФА в сравнении с фоном. В пределах пробной площади величина ФА меняется с 0,003 по 0,005. В Березовском бору, продуцирующем под многолетним воздействием выбросов тепловых станций, КраЗа и заводов правобережья города, на пробной площади ФА хвои изменяется от 0,004 до 0,009 и это максимальное значение ФА (рис. 1).

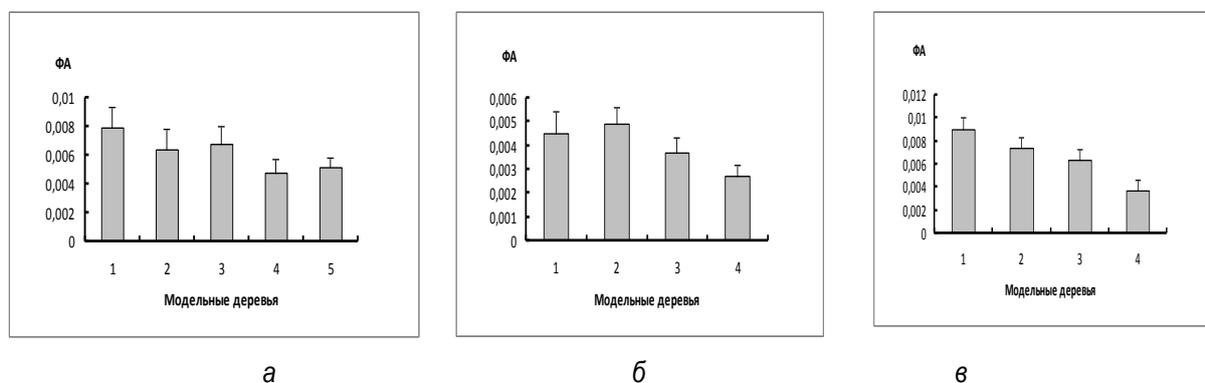


Рис. 1. Показатели флуктуирующей асимметрии хвои сосны обыкновенной: а – в фоновых условиях (сосновое насаждение Академгородка); б – в Есаульском бору; в – в Березовском бору

Полученные нами результаты сходны с результатами выявленных отклонений у хвой сосен из района г. Новокузнецка. В исследованиях значительной зависимости индекса флуктуирующей асимметрии от возраста не выявлено, однако отмечены более высокие показатели асимметрии [19]. Значительное увеличение ФА в окрестностях медно-никелевого комбината Мончегорска, как отмечают авторы, может являться неспецифической реакцией сосны на стрессовое воздействие. По мере удаления от источников загрязнения величина ФА уменьшается и наибольшая разница (0,2) в длине парной хвой (асимметрия) выявлена на площадке в 9 км от медно-никелевого комбината [8].

В отличие от северных лесов с низкой биологической продуктивностью и высоким уровнем многолетнего техногенного воздействия промышленности на Кольском полуострове, в наших исследованиях у сосен, растущих в лесостепных условиях, наибольшая разница в длине парной хвой (асимметрии) составляет только 0,05. Это в 4 раза меньше, чем для хвой сосны обыкновенной в зоне мощного влияния металлургического производства на Европейском Севере.

На основе результатов спектрометрии в хвое сосны обыкновенной были определены следующие микроэлементы: никель, хром, цинк, стронций (табл.).

Содержание тяжелых металлов в хвое сосны обыкновенной, мг/кг абс. сух. массы

Объект исследований	Микроэлемент			
	Ni	Cr	Zn	Sr
Сосновое насаждение (Академгородок) – фон	3,45±0,32	5,66±2,17	55,63±0,42	90,85±2,89
Берёзовский бор	3,79±0,39	6,69±2,67	65,84±0,55	146,32±3,67
Есаульский бор	6,65±0,35	7,88±2,51	69,21±0,5	106,7±3,44

Из данных таблицы видно, что заметная вариабельность наблюдается только в содержании цинка. Незначительные различия в содержании определенных элементов, вероятно, можно объяснить возросшим за последнее десятилетие влиянием токсичных выбросов автотранспорта. Известно, что при очень высоком содержании цинка в почвах обычным симптомом цинкового токсикоза является хлороз листьев [6]. А возникновение хлорозов и некрозов у хвойных деревьев при воздействии двуокиси серы наблюдается преимущественно после завершения роста ассимиляционных органов. Примечательно, что основные повреждения хвой сосны возникают в конце зимы – начале весны, при переходе к положительным температурам. В этот период происходят массовое побурение и опад хвой. Основные причины отмирания хвой связаны с нарушением восков на поверхности хвоинок и нерегулируемыми потерями хвоинками воды [1].

Высокое содержание тяжелых металлов в Есаульском и Берёзовском борах в хвое сосны обыкновенной объясняется их поступлением с потоком промышленных выбросов ветрами господствующего направления, а также их поглощением из почв, которые в этом районе характеризуются с 1995 года катастрофическим загрязнением тяжелыми металлами [23]. Адсорбируясь на поверхности растительных организмов, тяжелые металлы способны проникать внутрь клеток, вызывая изменение их физико-химических характеристик и физиологического состояния [22].

О характере влияния промышленных выбросов на древесную растительность могут свидетельствовать данные накопления в листьях фторидов и других элементов. В процессе многолетнего мониторинга за экологическим состоянием пригородных сосняков г. Красноярска установлено, что в хвое как опушечных сосен, так и в массивах Берёзовском и Есаульском, концентрации фтора варьируют от 7,7 до 21,3 мг/кг сух. массы. В среднем в хвое может содержаться в 5–11 раз больше фтора техногенного происхождения по сравнению с фоновыми насаждениями [23].

В работе А.С. Рожкова и Т.А. Михайловой [15] указывается, что под воздействием токсикантов в хвое первоначально происходит либо некоторое повышение содержания зеленых пигментов, либо незначительное понижение. Затем при интенсивном развитии некрозов (до 40 %) количество хлорофилла в сохранившейся зеленой хвое поддерживается на относительно высоком уровне и составляет 70–75 % от контрольного или выравнивается с последним. Разрушение пигментов, приводящее к хлорозу хвой, происходит не постепенно, а лишь при накоплении в ней токсиканта до критической величины. Эта величина, как и резистент-

ность в целом, неодинакова не только для хвои разного возраста, но и для одновозрастной, и даже для апикальной и базальной частей отдельных хвоинок.

Установлено, что у сосны в исследованных пригородных лесах Красноярска содержание пигментов в хвое второго года изменялось в зависимости от условий произрастания (рис. 2). Суммарное содержание зеленых пигментов (хлорофиллы а и б) было наибольшим в условиях фона (Академгородок) и наименьшим – в зоне непосредственного влияния промышленности города (в Березовском бору). При этом изменялось также и соотношение хлорофиллов, уменьшаясь под действием токсичных аэрозолей (рис. 3). Содержание желтых пигментов (каротиноидов) существенно ниже содержания хлорофилла и также подвержено влиянию загрязнителей (рис. 2). Это может являться результатом ингибирования их синтеза, с одной стороны, и действием высоких концентраций фтористых соединений и тяжелых металлов – с другой. Содержание хлорофилла а существенно уменьшалось на загрязнённых участках в сравнении с контролем, тогда как содержание хлорофилла б менялось в меньшей степени (рис. 3). Изменение содержания пигментов в хвое сосен приводит к нарушению фотосинтеза и продукционных процессов в целом, что может являться одной из причин уменьшения годовых приростов древесины у сосны из Березовского и Есаульского боров, расположенных в лесостепи [17, 20]. В таежных условиях под влиянием аналогичного токсичного загрязнения изменения пигментного комплекса сосны обыкновенной более выражены и имеют свои особенности [11].

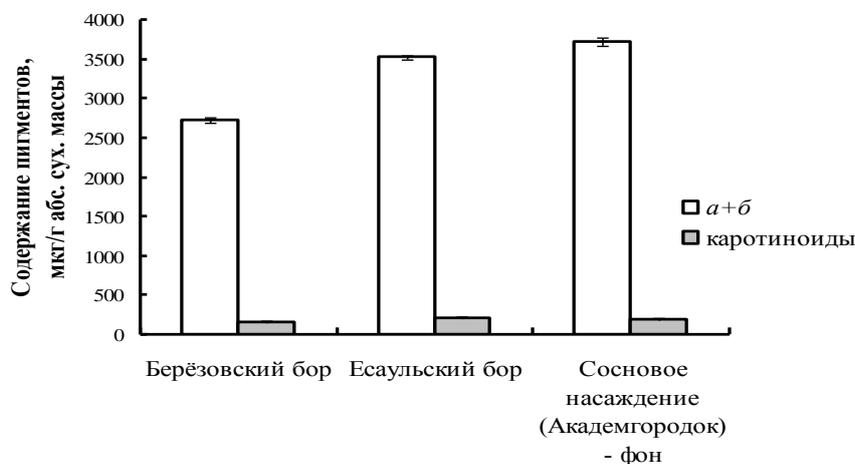


Рис. 2. Изменчивость содержания суммы хлорофиллов и каротиноидов в хвое сосны обыкновенной

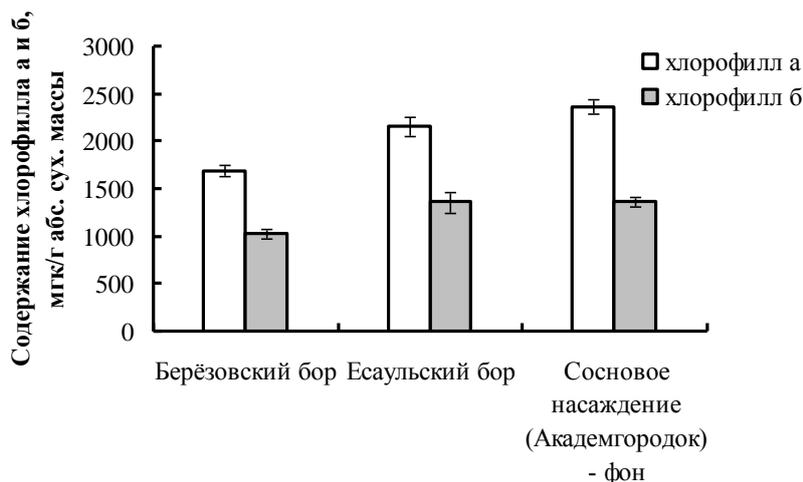


Рис. 3. Изменчивость содержания хлорофилла а и б в хвое сосны обыкновенной

Соотношение хлорофилла а/б невысокое (меньше 2) во всех местообитаниях, но в фоновых условиях выше, чем при загрязнении (рис. 4). Соотношение хлорофилл/каротиноиды в целом изменяется незначительно, так как при снижении содержания хлорофилла под влиянием загрязнения снижается и количество

каротиноидов (рис. 2, 4). Уменьшение соотношения пигментов в Берёзовском и Есаульском борах свидетельствует об адаптивных перестройках фотосинтезирующего аппарата сосны.

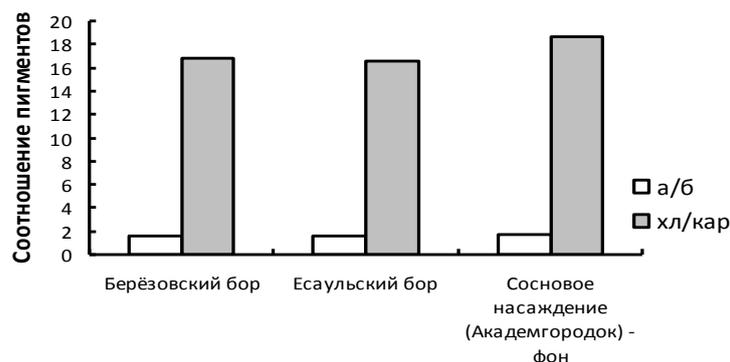


Рис. 4. Изменчивость соотношения хлорофиллов (а/б) и соотношения хлорофилла к каротиноидам (хл/кар.) в хвое сосны обыкновенной

Разная форма и цвет хвои связаны с прямым контактом живых тканей с химическими веществами разного происхождения и механическими ингредиентами (пыль, зола, сажа). Пыль нарушает температурный и водный режим растений, поглощение световой энергии и газообмен [18]. Вещества, входящие в состав техногенных аэрозолей, проникая через устьица, оказывают прямое токсическое воздействие на мезофилл. Вследствие такого взаимодействия происходит нарушение целостности клеток и тканей, что приводит к появлению различных морфологических изменений (хлорозы, некрозы). В данном случае было выявлено, что только в условиях фона отсутствуют хлорозы и некрозы, тогда как в Берёзовском, Есаульском борах на всей исследуемой хвое сосны обыкновенной присутствовали точечные и кончиковые хлорозы и некрозы.

Выводы

В исследуемых нарушенных многолетним техногенным прессом Берёзовском и Есаульском борах, расположенных по направлению господствующих ветров, понижено содержание хлорофилла и каротиноидов в хвое по сравнению с фоновыми условиями. Последнее свидетельствует о том, что в этих насаждениях под воздействием высоких техногенных нагрузок происходят отрицательные изменения на физиологическом уровне.

Данные ФА характеризуют качество среды в районах исследований как крайне неудовлетворительное и подтверждают ранее полученные результаты зонирования пригородной зоны г. Красноярск по дистанционным и наземным данным [18, 23]. Таким образом, выявлены нарушения равновесия на функциональном и структурном уровнях. Экологическое состояние обследованных насаждений можно отнести к начальной стадии антропогенной дигрессии, которая проявляется для сосновых насаждений в возрасте спелости.

Авторы выражают глубокую признательность инженеру отдела физико-химической биологии и биотехнологии древесных растений ИЛ СО РАН М.Н. Антоновой за техническую помощь во время проведения исследований.

Литература

1. Алексеев В.А. Атмосферное загрязнение и деградация лесов // Лесной комплекс Сибири. – Красноярск: ИЛД СО АН СССР, 1990. – С. 45–48.
2. Артамонов В.И. Растения и чистота природной среды. – М.: Наука, 1986. – 157 с.
3. Василевская Н.В., Тумарова Ю.М. Оценка стабильности развития популяций *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения // Биogeография Карелии: тр. Карельского научного центра РАН. – Петрозаводск, 2005. – Вып. 7. – С. 21–25.

4. Гавриленко В.Ф., Ладьюгина М.Е., Хандобина Л.М. Большой практикум по физиологии растений. Фотосинтез. Дыхание: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1975. – 392 с.
5. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края в 2010 году». – Красноярск, 2011. – 232 с.
6. Данилов В.П. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: справочник. – Л., 1990.
7. Захаров В.М., Чубинишвили А.Т., Дмитриев С.Г. Здоровье среды: практика оценки. – М.: Центр экологической политики России, 2000. – 320 с.
8. Кизеев А.Н. Изменения морфологических и физиолого-биохимических показателей хвои сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1. – № 3. – С. 120–128.
9. Лакин Г.Ф. Биометрия. – М.: Высш. шк., 1990. – 293 с.
10. Мальхотра С.С., Хан А.А. Биохимическое и физиологическое действие приоритетных загрязняющих веществ. Загрязнение воздуха и жизнь растений. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – С. 144–190.
11. Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Игнатьева О.В. Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения / отв. ред. А.С. Плешанов. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2006. – 134 с.
12. Неверова О.А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // Биосфера. – 2012. – Т. 4. – № 1. – С. 82–92.
13. Неверова О.А. Экологическая оценка состояния древесных растений и загрязнения окружающей среды промышленного города (на примере г. Кемерово): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – М., 2004. – 37 с.
14. Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. – М., 1964. – 160 с.
15. Рожков А.С., Михайлова Т.А. Действие фторсодержащих эмиссий на хвойные деревья. – Новосибирск: Наука, 1989. – 159 с.
16. Свалов Н.Н. Вариационная статистика. – М.: Лесн. пром-сть, 1977. – 176 с.
17. Влияние комплекса техногенных и рекреационных нагрузок на развитие тканей ствола сосны обыкновенной в Красноярской лесостепи / Л.Н. Скрипальщикова, В.В. Стасова, В.Д. Перевозникова [и др.] // Изв. РАН. – 2009. – № 5. – С. 1–8.
18. Экологический мониторинг техногенных ландшафтов на основе наземных и дистанционных данных / Л.Н. Скрипальщикова, В.И. Харук, О.Н. Зубарева [и др.] // География и природные ресурсы. – 2002. – № 3. – С. 31–34.
19. Соболева О.М., Кондратенко Е.П., Пинчук Л.Г. Комплексная оценка состояния ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в г. Новокузнецке // Вестн. Алтай. гос. аграр. ун-та. – 2009. – № 7. – С. 33–36.
20. Строение и развитие проводящих и запасающих тканей в стволах сосны обыкновенной в антропогенно нарушенных экосистемах / В.В. Стасова, Л.Н. Скрипальщикова, А.И. Татаринцев [и др.] // Вестн. МГУЛ. – 2009. – № 1. – С. 39–44.
21. Чередникова Ю.С., Молокова Н.И., Перевозникова В.Д. Особенности типологической структуры лесов зеленой зоны г. Красноярска // Ботанические исследования в Сибири. – Красноярск, 1999. – С. 176–180.
22. Чернышенко О.В. Поглощительная способность и газоустойчивость древесных растений в условиях города. – М.: МГУЛ, 2002. – 120 с.
23. Экологическое состояние пригородных лесов Красноярска. – Новосибирск: Гео, 2009. – 179 с.
24. Ярмишко В.Т. Особенности роста и формирования наземной фитомассы сосны // Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова. – Л., 1990. – С. 55–64.
25. Kozlov M.V., Niemela P. Difference in needle length – a new and objective indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // Water, Air and Soil Pollution. – 1999. – Vol. 116. – P. 365–370.
26. Kozlov M.V., Zvereva E.L., Niemela P. Shoot fluctuating asymmetry – a new and objective stress index in Norway spruce (*Picea abies*) // Can. J. For. Res. – 2001. – Vol. 31. – P. 1289–1291.
27. Methods in comparative plant ecology. A laboratory manual. Eds. G.A.F. Hendry and L.P. Grime. Chapman and Hall. – 1993. – P. 148–152.
28. Palmer A.R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry: measurement, analysis, patterns // Ann. Rev. Ecol. Syst. – 1986. – Vol. 17. – P. 391–421.

