



УДК 630\*181:[674.032.475.4/.7]

### **ТРОПОСФЕРНЫЙ ОЗОН И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАННИЕ ЭТАПЫ РОСТА И РАЗВИТИЯ СОСНЫ И ЕЛИ РАЗНОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ\***

© *Н.А. Прожерина, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.*

Институт экологических проблем Севера УрО РАН, наб. Северной Двины, 23,  
г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: pronad1@yandex.ru

Все возрастающее воздействие человека на природу привело к увеличению содержания в атмосфере Земли парниковых газов, изменяющих энергетический баланс в экосистемах. Цель данной работы – исследовать на ранних этапах развития реакцию сеянцев сосны и ели происхождением из разных регионов европейской части России на воздействие повышенной концентрации приземного озона. Эксперимент проводили в течение двух вегетационных сезонов в ботаническом саду Университета г. Куопио (Финляндия) на 4 контрольных площадях и 4 открытых фумигационных площадках, где концентрация озона превышала естественную в 1,4 раза. Исследования показали, что повышение концентрации озона в приземном слое атмосферы вызывает снижение количества проросших семян у сосны обыкновенной, у ели этот показатель под воздействием озона статистически достоверно не изменялся. Были выявлены статистически значимые различия длины побегов у сосны и ели разного географического происхождения. Накопление сухой массы хвои под воздействием озона снижалось у наиболее северных популяций сосны. У ели статистически значимых изменений в накоплении биомассы хвои, корней и побегов не происходило, но отмечался тренд к увеличению содержания абсолютно сухой массы, за исключением северной популяции (ель сибирская) из Пинежского района Архангельской области. Повышение концентрации озона статистически значимо не повлияло на длину хвои как сосны, так и ели всех изученных нами географических происхождений, что подтверждает сделанный нами ранее вывод о стабильности этого показателя и при воздействии других воздушных загрязнителей. Нами установлено, что потомства популяций сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) более чувствительны к воздействию озона, чем потомства популяций ели (*Picea spp.*). Данные свидетельствуют о том, что возрастающая концентрация приземного атмосферного озона может нарушать процессы прорастания семян, рост сеянцев сосны и ели и иметь большие негативные последствия для лесовозобновления в будущем.

*Ключевые слова:* тропосферный озон, сосна, ель, географическое происхождение, ростовые процессы.

---

\*Исследования выполнены при финансовой поддержке INTAS 05-109-4946 «Изучение совместного влияния окислительного стресса, увеличения температуры и концентрации углекислого газа в атмосфере на раннее развитие сосны и ели различного географического происхождения» и ФАНО в рамках темы № 0410-2014-0025 «Структура и динамика компонентов лесных сообществ Европейского Севера России».

*Введение*

Проблема глобального изменения климата является актуальной для человечества в течение последних десятилетий. Все возрастающее воздействие человека на природу привело к увеличению содержания в атмосфере Земли парниковых газов (углекислый газ, метан, озон, оксиды азота), изменяющих энергетический баланс в экосистемах. Так, концентрация озона за последние 100 лет увеличилась вдвое и продолжает расти со скоростью 0,5...2,5 % в год [9]. Средняя продолжительность жизни молекулы озона составляет 3 нед., что позволяет этому высокотоксичному веществу распространяться на большие расстояния. Таким образом, проблема загрязнения озоном перестает носить региональный характер и становится общемировой.

Озон встречается в двух атмосферных слоях: в тропосфере – слой приземного озона на высоте до 10 км (особенно на высоте 0...1 км), составляющий ~5 %, в стратосфере – озоновый слой на высоте 10...50 км (особенно на высоте 30...50 км), составляющий ~95 %. Эти два слоя находятся в постоянном взаимодействии друг с другом.

В загрязненном приземном слое путем окисления летучих органических соединений в присутствии окислов азота и солнечного света образуется не только озон, но и другие продукты, например пероксиацетилнитрат, азотная кислота, альдегиды, органические кислоты и многие нестабильные радикалы [5].

С начала 70-х гг. XX в. в Европе работает Программа ЕМЕП (Европейская совместная программа мониторинга и оценки переноса воздушных загрязнений на большие расстояния). Озон измеряется по всей Европе как в сельских местностях (участки ЕМЕП), так и во многих городах. В России системные исследования по мониторингу приземного озона отсутствуют. Установлено, что вдоль Транссибирской магистрали концентрация озона постепенно возрастает в восточном направлении вследствие лесных пожаров, окисления выделяющегося метана в Сибири и трансграничного переноса продуктов горения из районов Северного Китая. Также на концентрацию озона значимый эффект оказывает взаимодействие стратосферного и тропосферного озона [3]. В течение полярного дня фотохимическая генерация озона ультрафиолетовым излучением Солнца является основным процессом, определяющим его содержание в приземном слое высокоширотной атмосферы. В то же время переход в режим полярной ночи приводит к сильному ослаблению суточной вариации содержания озона в приземном слое [1].

Озон является одним из наиболее опасных токсичных веществ. Всемирная организация здравоохранения включила его в список пяти основных загрязнителей, содержание которых необходимо контролировать при определении качества воздуха [4]. На человека озон оказывает общетоксическое, раздражающее, канцерогенное, мутагенное, генотоксическое действие [2]. Для растительности он не менее токсичен. Фитотоксический эффект тропосферного озона хорошо изучен. Показано, что он ведет к преждевременному старению растений и нарушению углеродного цикла из-за снижения фиксации

углекислоты [7]. На модельных растениях экспериментально установлено влияние тропосферного озона на физиологию, ростовые процессы, структуру листа, биохимию, молекулярные изменения, в том числе на экспрессию генов [14]. Критическим уровнем концентрации приземного озона для древесной растительности, приводящим к снижению ростовых процессов на 5 %, определено значение показателя АОТ 40\* = 5,0 см<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·ч) [16], ранее оно было установлено на уровне 10,0 см<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·ч). Нами отмечено замедление ростовых процессов и возникновение видимых симптомов повреждения озоном у березы в фумигационных камерах при АОТ 40 = 10,7 см<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·ч) [15]. В обзоре [10] показана зависимость снижения накопления биомассы у березы повислой с увеличением концентрации приземного озона от 0 до 90,0 см<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·ч).

Изучение воздействия озона на сельскохозяйственные растения, имеющие важное продовольственное значение, и на основные лесобразующие породы, выполняющие важную функцию депонирования углерода в лесных экосистемах, проводилось либо в европейских странах, либо в странах Северной Америки. Подобные исследования в настоящее время практически отсутствуют в России, нет данных ни о воздействии озона на растительность, ни о характере и масштабах такого влияния.

Цель данной работы – исследовать реакцию сеянцев сосны и ели происхождением из разных регионов европейской части России на воздействие повышенной концентрации приземного озона на ранних этапах развития хвойных растений, основных пород-лесообразователей.

#### *Материалы и методы*

Воздействие озона изучалось на сеянцах сосны обыкновенной, представленной пятью происхождениями, из которых четыре из России: два района из Архангельской (Пинежский и Вельский), по одному из Нижегородской и Воронежской (южная граница ареала вида на европейской части России) областей (табл. 1). В эксперимент также были включены семена локальной популяции сосны обыкновенной (Куопио, Финляндия). Ель была представлена четырьмя происхождениями разных видов: ель европейская (популяции из района Куопио (Финляндия) и Новгородской области; семена ели сибирской были собраны в восточной части Архангельской области (Пинежский район); гибридная ель (Вельский район Архангельской области) занимает промежуточное происхождение по широте и долготе.

Сто семян каждого происхождения были посеяны в 5-литровые горшки, наполненные смесью песка и торфа в соотношении 1:3. Всего 72 горшка, которые сразу после посева семян были распределены по 8 экспериментальным площадкам. Эксперимент проводили в ботаническом саду Университета

---

\* Accumulated ozone exposure over a threshold of 40 parts per billion (ppb) – совокупное воздействие, превышающее пороговое значение 40 мм<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> в дневное время суток в течение вегетационного периода.

Таблица 1

**Происхождение семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.),  
ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.)  
и гибридной ели (*Picea abies* (L.) Karst × *P. obovata* Ledeb.)**

Вид	Происхождение	Географические координаты
<i>Pinus sylvestris</i> L.	Пинежский район	64°48' с.ш., 43°17' в.д.
« «	Куопио (Финляндия)	62°35' с.ш., 28°10' в.д.
« «	Вельский район	61°06' с.ш., 42°17' в.д.
« «	Нижний Новгород	56°27' с.ш., 44°08' в.д.
« «	Воронеж	54°01' с.ш., 39°16' в.д.
<i>Picea obovata</i> Ledeb.	Пинежский район	65°01' с.ш., 42°47' в.д.
<i>P. abies</i> (L.) Karst.	Куопио (Финляндия)	62°48' с.ш., 26°32' в.д.
« « «	Новгород	58°31' с.ш., 31°20' в.д.
<i>P. abies</i> (L.) Karst × <i>P. obovata</i> Ledeb.	Вельский район	60°45' с.ш., 42°03' в.д.

г. Куопио (62°13' с.ш., 27°35' в.д.) на 4 открытых фумигационных площадках и 4 контрольных площадях [11]. Ежедневно горшки перемещали в пределах площадки для более равномерного влияния озона и других климатических факторов. Эксперимент проводили в течение двух вегетационных сезонов, в зимнее время горшки с сеянцами погружали в грунт и закрывали еловым лапником. Весной второго года вегетации сеянцы из каждого горшка были поделены на 3 части и пересажены в новые горшки, количество которых увеличилось до 216 шт. В период с мая по сентябрь фумигацию озоном осуществляли в течение 14 ч в сутки (с 8:00 до 22:00). В среднем за два сезона концентрация приземного озона на экспериментальных площадках превысила таковую на контрольных участках в 1,4 раза, составив 11,0 см<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·ч).

Число проросших семян (в процентах к общему числу) было подсчитано через 2 нед. после их посева. Длину побега измеряли дважды: в начале и в конце каждого вегетационного сезона. По окончании эксперимента были определены длина хвои, абсолютно сухая масса хвои, побегов и корней (у 5 растений в каждой повторности).

*Результаты и обсуждение*

Исследования показали, что повышение концентрации озона в приземном слое атмосферы вызывает снижение количества проросших семян, особенно у сосны обыкновенной. Статистически достоверны различия в количестве проросших семян для сосны и ели между разными географическими происхождениями (табл. 2). Полученные нами результаты показывают, что семена северных популяций сосны более чувствительны к воздействию озона, чем южных популяций. Повышение концентрации приземного озона уменьшило число проросших семян у наиболее северных популяций сосны обыкновенной

Таблица 2

**Уровень статистической значимости влияния (Р значение)  
повышенной концентрации озона и разного географического происхождения  
семян, а также взаимодействия этих факторов на сеянцы  
(многофакторный дисперсионный анализ)**

Показатель	Озон	Происхождение семян	Взаимодействие факторов
<i>Сосна обыкновенная</i>			
Количество проросших семян	0,013	0,000	0,425
Длина побега:			
июнь первого года	0,639	0,000	0,430
октябрь « «	0,694	0,000	0,784
июнь второго года	0,000	0,000	0,005
август « «	0,000	0,000	0,012
Длина хвои	0,484	0,000	0,122
Сухая масса:			
хвои	0,457	0,000	0,038
побегов	0,000	0,000	0,057
корней	0,009	0,027	0,004
Общая сухая масса растения	0,000	0,000	0,007
<i>Ель обыкновенная</i>			
Количество проросших семян	0,460	0,004	0,674
Длина побега:			
июнь первого года	0,909	0,004	0,970
октябрь « «	0,004	0,000	0,306
июнь второго года	0,830	0,701	0,570
август « «	0,672	0,826	0,127
Длина хвои	0,085	0,000	0,628
Сухая масса			
хвои	0,040	0,011	0,870
побегов	0,141	0,012	0,821
корней	0,097	0,330	0,431
Общая сухая масса растения	0,529	0,191	0,750

из Вельска и Пинеги. У ели число проросших семян статистически достоверно не изменялось под воздействием озона. Ранее проведенные исследования по прорастанию семян кукурузы (*Zea mays*) также свидетельствуют, что длительное воздействие озона ведет к снижению прорастания семян [18]. Это происходит во многом потому, что озон задерживает процессы клеточного деления и растяжения вновь образованных клеток. Негативный эффект воздействия озона был обнаружен и для березы бумажной (*Betula papyrifera*), у которой снижалась масса и всхожесть семян [8].

Для длины побегов были выявлены статистически значимые различия между разными географическими происхождениями, но для сосны это было характерно в течение двух сезонов вегетации, для ели – только в первый год (табл. 2). Повышенная концентрация приземного озона в течение первого

года вегетации не оказала воздействия на сеянцы сосны и ели. Во второй вегетационный сезон наблюдалось снижение скорости роста под воздействием озона у сосны всех географических происхождений уже в июне, в период наиболее активного роста побегов. В конце второго вегетационного сезона снижение прироста у сосны в среднем колебалось в пределах 14...66 % по сравнению с контрольными растениями. Длина побегов у ели ни в начале, ни в конце второго сезона вегетации не изменялась под воздействием озона. Исключением были сеянцы ели европейской происхождения из Новгородской области, у которой наблюдалась стимуляция роста к августу до 50 %.

Накопление сухой массы хвои под воздействием озона снижалось у наиболее северных популяций сосны из Пинежского и Вельского районов Архангельской области, а также локальной северной популяции сосны из района Куопио. При этом у сеянцев сосны более южного происхождения сухая масса хвои под влиянием озона не изменялась, аналогичная зависимость была отмечена в работе S. Manninen с соавторами [12]. У ели статистически значимых изменений в накоплении биомассы хвои, корней и побегов не выявлено, но отмечен тренд к увеличению содержания абсолютно сухой массы у всех происхождений ели, за исключением наиболее северной популяции из Пинежского района Архангельской области.

Таким образом, необходимо отметить наличие кумулятивного эффекта воздействия озона на ростовые процессы у хвойных растений. Подобное соотносится с данными J. Utriainen и T. Holopainen [17], которые показали снижение ростовых процессов и накопления биомассы побегов сосны обыкновенной только после трех лет фумигации озоном. Это снижение ростовых процессов у саженцев сосны сопровождалось преждевременным опадом хвои и изменениями в ультраструктуре клеток ассимиляционного аппарата. Для березы повислой также был обнаружен кумулятивный эффект воздействия озона, который сопровождался снижением интенсивности фотосинтеза, устойчивой проводимости, компенсаторных реакций защитных антиокислительных систем, что в свою очередь приводило к уменьшению накопления запасных питательных веществ (уменьшается количество и размеры гран крахмала в хлоропластах), а также к нарушениям закладки почек, что отражалось на росте и развитии растений в следующем вегетационном сезоне [13].

Повышение концентрации озона статистически значимо не повлияло на длину хвои как сосны, так и ели всех изученных нами географических происхождений, что подтверждает сделанный нами ранее вывод о стабильности этого показателя при воздействии других воздушных поллютантов [6].

#### *Заключение*

Нами установлено, что потомства популяций сосны обыкновенной более чувствительны к воздействию озона, чем потомства популяций ели, что согласуется с современными данными мета-анализа и данными обзоров по устойчивости лесной растительности к воздействию неблагоприятных факторов окружающей

среды [19]. Наши данные свидетельствуют о том, что возрастающая концентрация приземного атмосферного озона может нарушать процессы прорастания семян, роста сеянцев сосны и ели и иметь большие негативные последствия для лесовозобновления в будущем. Особенно эта проблема может стать актуальной для северных лесов, у которых, по-видимому, в экстремальных природных условиях система антиоксидантной защиты не может справиться с дополнительными стрессовыми факторами. В условиях высоких широт, когда период интенсивного роста растений происходит на фоне полярного дня, благоприятного для формирования озона в приземных слоях атмосферы, особенно в присутствии антропогенных выбросов – предшественников озона, его воздействие на лесные экосистемы может быть достаточно сильным.

Результаты по изучению роста сеянцев сосны и ели показывают достоверные различия в ответной реакции на воздействие озона у потомств разных популяций одного и того же вида хвойных. Но это только начало исследований реакции хвойных на воздействие озона на европейской части России, которые необходимо продолжать для установления более точных связей между ростовыми процессами и разными генотипами хвойных растений и влиянием приземного озона. Использованный нами градиентный географический подход при подборе популяций для исследования может дать возможность построения прогнозных моделей для оценки последствий воздействия такого стрессового фактора, как повышение концентрации приземного озона в атмосфере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоглазов М.И., Карпечко А.Ю., Никулин Г.Н., Ролдугин В.К., Румянцев С.А. О некоторых экологических аспектах проблемы атмосферного озона по результатам измерений на Кольском полуострове // Материалы конф. «Природопользование в Евро-Арктическом регионе: опыт XX века и перспективы», Апатиты, 2–4 ноября 2000 г. Апатиты: КНЦ РАН, 2001. С. 184–192.
2. Грушко Я.М. Вредные неорганические соединения в промышленных выбросах в атмосферу: справ. Л.: Химия, 1987. 207 с.
3. Панкратова Н.В., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лаврова О.В., Скороход А.И., Шумский Р.А. Озон и окислы азота в приземном воздухе северной Евразии по наблюдениям в экспериментах TROICA // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 343–358.
4. Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокиси азота и двуокиси серы. Глобальные обновленные данные 2005 года. 2006. 31 с.
5. Руководство по методам и критериям согласованного отбора проб, оценки, мониторинга и анализа влияния загрязнения воздуха на леса. Ч. X. Мониторинг качества воздуха // Экономическая комиссия ООН для Европы. 2000. 28 с.
6. Тарханов С.Н., Прожерина Н.А., Коновалов В.Н. Лесные экосистемы бассейна Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения: диагностика состояния. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 333 с.
7. Ashmore M.R. Assessing the future global impacts of ozone on vegetation // Plant, Cell and Environment. 2005. Vol. 28. P. 949–964.

8. Darbah J.N.T., Kubiske M., Nelson N., Oksanen E., Vapaavuori E., Karnosky D.F. Effects of decadal exposure to interacting elevated CO<sub>2</sub> and/or O<sub>3</sub> on paper birch (*Betula papyrifera*) reproduction // Environmental Pollution. 2008. Vol. 155. P. 446–452.
9. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Technical summary. Climate change 2007: The physical science basis // Cambridge University Press. 996 p.
10. Karlsson P.E., Braun S., Broadmeadow M., Elvira S., Emberson L., Gimeno B.S., Le Thiec D., Novak K., Oksanen E., Schaub M., Uddling J., Wilkinson M. Risk assessments for forest trees: The performance of the ozone flux versus the AOT concepts // Environmental Pollution. 2007. Vol. 146. P. 608–616.
11. Karnosky D.F., Werner H., Holopainen T., Percy K., Oksanen T., Oksanen E., Heerd C., Fabian P., Nagy J., Heilman W., Cox R., Nelson N., Matyssek R. Free-air exposure systems to scale up ozone research to mature trees. Review Article// Plant Biology. 2007. Vol. 9. P. 181–190.
12. Manninen S., Siivonen N., Timonen U., Huttunen S. Differences in ozone response between two Finnish wild strawberry populations // Environmental and Experimental Botany. 2003. Vol. 49. P. 29–39.
13. Oksanen E. Responses of selected birch (*Betula pendula*) clones to ozone change over time // Plant, Cell and Environment. 2003. Vol. 26. P. 875–886.
14. Overmyer K., Kollist H., Tuominen H., Betz C., Langebartels C., Wingsle G., Kangasjärvi S., Brader G., Mullineaux P., Kangasjärvi J. Complex phenotypic profiles leading to ozone sensitivity in *Arabidopsis thaliana* mutants // Plant, Cell and Environment 2008. Vol. 31. P. 1237–1249.
15. Prozherina N., Freiwald V., Rousi M., Oksanen E. Interactive effect of springtime frost and elevated ozone on early growth, foliar injuries and leaf structure of birch (*Betula pendula* Roth) // New Phytologist. 2003. Vol. 159. P. 623–636.
16. UNECE. Mapping critical levels for vegetation. Chapter 3: Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. Umweltbundesamt. Berlin. Germany, 2004. 266 p.
17. Utriainen J. and Holopainen T. Nitrogen availability modifies the ozone responses of Scots pine seedlings exposed in an open-field system // Tree Physiology. 2001. Vol. 21. P. 1205–1213.
18. Violleau F., Hadjeba K., Albet J., Cazalis R., Surel O. Effect of oxidative treatment on corn seed germination kinetics // Ozone: Science & Engineering. 2008. Vol. 30. P. 418–422.
19. Wittig V.E., Ainsworth E.A., Naidu S.L., Karnosky D.F., Long S.P. Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis // Global Change Biology. 2009. Vol. 15. P. 396–424.

Поступила 05.02.14

UDC 630.181:[674.032.475.4/.7]

### **Tropospheric Ozone and Its Impact on the Early Growth and Development of Scots Pine and Spruce of Different Geographical Origins**

*N.A. Prozherina, Candidate of Biology, Senior Researcher*

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russia;  
e-mail: pronad1@yandex.ru



The increasing human impact on environment has led to increasing greenhouse gases concentrations in the Earth atmosphere and changing the energy balance in the ecosystems. The aim of this study to investigate reaction of pine and spruce seedlings, originating from different regions of the European part of Russia on the effects of elevated concentrations of ground-level ozone on the early stages of the development of conifers. The experiment was conducted over two growing seasons in the Botanical Garden of the Kuopio University, Finland, on 4 control fields and 4 ozone fields. In ozone fields gas concentrations exceed the ambient in 1.4 times. Increasing ozone concentration in the atmospheric surface layer caused a decrease in the amount of germinated seeds, especially for Scots pine. Amount of germinated seeds of spruce under the ozone influence significantly did not change. Statistically significant differences of shoots length between the different geographical pine and spruce origins were found. The needles dry mass accumulation under ozone exposure was decreased mainly in the northern pine populations. Statistically significant changes in the spruce accumulation of needles, roots and shoots biomass did not found. However we observed trend to dry weight increasing in the all origins, except in the most northern population from the Pinega, the Arkhangelsk region. Elevated ozone concentrations did not significantly change pine and spruce needle length in all studied geographical origins. This confirms our previous conclusion about the stability of this parameter under the impact of other air pollutants. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) populations are more sensitive to ozone than of the Spruce (*Picea* spp.) populations. Elevating ozone in the atmospheric ground-level can destroy the germination of seeds and growth of Pine and Spruce seedlings. This can have large negative consequences on conifers regeneration in the future.

*Keywords:* tropospheric ozone, Scots pine, spruce, geographical origins, growth.

#### REFERENCES

1. Beloglazov M.I., Karpechko A.Yu., Nikulin G.N., Roldugin V.K., Rummyantsev S.A. O nekotorykh ekologicheskikh aspektakh problemy atmosfernogo ozona po rezul'tatam izmereniy na Kol'skom poluostrove [Some Ecological Aspects of the Problem of Atmospheric Ozone Measured in the Kola Peninsula]. *Prirodopol'zovanie v Evro-Arkticheskom regione opyt XX veka i perspektivy* [Nature in the Euro-Arctic Region, Experiences of the Twentieth Century and Prospects: Proc.Conf.]. Apatity, 2000, pp. 184–192.
2. Grushko Ya.M. *Vrednye neorganicheskie soedineniya v promyshlennykh vybro-sakh v atmosferu* [Harmful Inorganic Compounds in Industrial Emissions into the Atmosphere]. Leningrad, 1987. 207 p.
3. Pankratova N.V., Elanskiy N.F., Belikov I.B., Lavrova O.V., Skorokhod A.I., Shumskiy R.A. Ozon i okisly azota v prizemnom vozdukh severnoy Evrazii po nablyudeniyam v eksperimentakh TROICA [Ozone and Nitrogen Oxides in the Ground Level in Northern Eurasia by the Observations in the Experiments TROICA]. *Fizika atmosfery i okeana*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 343–358.
4. *Rekomendatsii VOZ po kachestvu vozdukha, kasayushchiesya tverdykh chastits, ozona, dvoukisi azota i dvoukisi sery. Global'nye obnovlennye dannye 2005 god* [WHO Guidelines on Air Quality Related to Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. Global Update 2005]. 2006. 31 p.
5. Rukovodstvo po metodam i kriteriyam soglasovannogo otbora prob, otsenki, monitoringa i analiza vliyaniya zagryazneniya vozdukha na lesa. [Procedures and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Impact of Air Pollution on Forests]. *Monitoring kachestva vozdukha* [Ambient Air Quality Monitoring]. 2000. 28 p.

6. Tarkhanov S.N., Prozherina N.A., Konovalov V.N. *Lesnye ekosistemy basseyna Severnoy Dviny v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya: diagnostika sostoyaniya* [Forest Ecosystems of the Northern Dvina Basin Under Atmospheric Pollution: Diagnosis of the State]. Ekaterinburg, 2004. 333 p.
7. Ashmore M.R. Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. *Plant, Cell and Environment*, 2005, Vol. 28, pp. 949–964.
8. Darbah J.N.T., Kubiske M., Nelson N., Oksanen E., Vapaavuori E., Karnosky D.F. Effects of decadal exposure to interacting elevated CO<sub>2</sub> and/or O<sub>3</sub> on paper birch (*Betula papyrifera*) reproduction. *Environmental Pollution*, 2008, Vol. 155, pp. 446–452.
9. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Technical summary. Climate change 2007: The physical science basis. Cambridge University Press. 996 p.
10. Karlsson P.E., Braun S., Broadmeadow M., Elvira S., Emberson L., Gimeno B.S., Le Thiec D., Novak K., Oksanen E., Schaub M., Uddling J., Wilkinson M. Risk assessments for forest trees: The performance of the ozone flux versus the AOT concepts. *Environmental Pollution*, 2007, Vol. 146, pp. 608–616.
11. Karnosky D.F., Werner H., Holopainen T., Percy K., Oksanen T., Oksanen E., Heerd C., Fabian P., Nagy J., Heilman W., Cox R., Nelson N., Matyssek R. Free-air exposure systems to scale up ozone research to mature trees. Review Article. *Plant Biology*, 2007, Vol. 9, pp. 181–190.
12. Manninen S., Siivonen N., Timonen U., Huttunen S. Differences in ozone response between two Finnish wild strawberry populations. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, Vol. 49, pp. 29–39.
13. Oksanen E. Responses of selected birch (*Betula pendula*) clones to ozone change over time. *Plant, Cell and Environment*, 2003, Vol. 26, pp. 875–886.
14. Overmyer K., Kollist H., Tuominen H., Betz C., Langebartels C., Wingsle G., Kangasjärvi S., Brader G., Mullineaux P., Kangasjärvi J. Complex phenotypic profiles leading to ozone sensitivity in *Arabidopsis thaliana* mutants. *Plant, Cell and Environment*, 2008, Vol. 31, pp. 1237–1249.
15. Prozherina N., Freiwald V., Rousi M., Oksanen E. Interactive effect of springtime frost and elevated ozone on early growth, foliar injuries and leaf structure of birch (*Betula pendula* Roth). *New Phytologist*, 2003, Vol. 159, pp. 623–636.
16. UNECE. Mapping critical levels for vegetation. Chapter 3: Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. 2004. Umweltbundesamt. Berlin. Germany. 266 p.
17. Utriainen J. and Holopainen T. Nitrogen availability modifies the ozone responses of Scots pine seedlings exposed in an open-field system. *Tree Physiology*, 2001, Vol. 21, pp. 1205–1213.
18. Violleau F., Hadjeba K., Albet J., Cazalis R., Surel O. Effect of oxidative treatment on corn seed germination kinetics. *Ozone: Science & Engineering*, 2008, Vol. 30, pp. 418–422.
19. Wittig V.E., Ainsworth E.A., Naidu S.L., Karnosky D.F., Long S.P. Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis. *Global Change Biology*, 2009, Vol. 15, pp. 396–424.

Received on February 5, 2014