

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ РАЗВИТИЯ ПОПУЛЯЦИЙ *PINUS SYLVESTRIS* L. В УСЛОВИЯХ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Н. В. ВАСИЛЕВСКАЯ, Ю. М. ТУМАРОВА

Мурманский государственный педагогический университет

Изучено воздействие аэротехногенного загрязнения среды на стабильность развития популяций *Pinus sylvestris* L. в Центральном районе Мурманской области. Установлены нарушения в росте и развитии популяций сосны по мере приближения к промышленным комбинатам Североникель и Ковдорский ГОК, что выражается в уменьшении длины хвои, увеличении асимметрии в ее длине и возрастании индекса флуктуирующей асимметрии. Изученные показатели могут быть использованы как индикаторы раннего обнаружения стресса.

N. V. VASILEVSKAYA, J. M. TUMAROVA. EVALUATION OF THE *PINUS SYLVESTRIS* L. POPULATION DEVELOPMENT UNDER INDUSTRIAL AIR-BORNE POLLUTION (MURMANSK REGION)

The effect of industrial air-borne pollution on the stability of the development of *Pinus sylvestris* L. populations was investigated in the Central district of the Murmansk region. Surveys revealed disturbed growth and development of pine populations progressing towards the Severonickel smelter and Kovdorsky ore-dressing mill. The manifestations are shorter needles, higher asymmetry in needle length and higher fluctuating asymmetry index. The indices can be used for early diagnosis of stress.

Одним из перспективных направлений интегральной оценки уровня загрязнения среды является биологический мониторинг, при котором основным показателем стрессового воздействия является нарушение развития организмов и их популяций. Стрессовые факторы вызывают изменение гомеостаза развития, которые могут быть оценены по нарушению морфогенетических процессов (Захаров и др., 2000). Главными показателями изменений гомеостаза с морфологической точки зрения являются показатели флуктуирующей асимметрии (ненаправленных различий между правой и левой сторонами раз-

личных морфологических структур, в норме обладающих билатеральной симметрией). При нормальных условиях величина асимметрии минимальна, при любых стрессовых воздействиях она возрастает. Флуктуирующая асимметрия (ФА) возникает вследствие нарушения стабильности развития организма и может использоваться для оценки стрессового воздействия внешней среды на живые организмы. С другой стороны, индекс ФА отражает способность различных видов переносить стрессовые воздействия без вреда для себя и своего потомства (Захаров и др., 2000).

Метод биоиндикации, основанный на определении флуктуирующей асимметрии, широко применяется в России и за рубежом в популяционных исследованиях. Российские ученые используют его для изучения гомеостаза развития природных популяций растений и животных урбанизированных территорий и заповедников (Кузьмин и др., 1989; Кряжева, Чистякова, 1996; Чубинишвили, 1998; Захаров и др., 1997, 2000; Нефедова и др., 2000; Шержукова и др., 2002). В Европе метод флуктуирующей асимметрии используется в промышленной экологии (Freedman, 1989; Freeman et al., 1994; Kozlov et al., 1996; 1999; 2001; 2002; Zvereva et al., 1997a,b; Valkama et al., 2001).

Одним из наиболее удобных объектов (органов) для исследования стабильности развития растений является лист, испытывающий максимальное воздействие внешних факторов. В Мурманской области флуктуирующая асимметрия изучалась на листьях березы извилистой (*Betula pubescens ssp. tortuosa* (Ledeb.) Nym.) (Kozlov et al., 1996) и ивы северной (*Salix borealis* (Fries) Nas.) (Zvereva et al., 1997a,b) в окрестностях г. Мончегорска. В г. Мурманске и его окрестностях проведены исследования стабильности развития популяции березы субарктической (*Betula pubescens ssp. subarctica* (Orlova) A.& D.Love) (Василевская, Лукина, 2001). Метод оценки устойчивости развития, основанный на измерении флуктуирующей асимметрии у хвойных растений, был разработан и впервые применен М. В. Козловым (Kozlov et al., 1999, 2002) для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L. Karst) (Kozlov et al., 2001).

Цель исследования: определение стабильности развития популяций *Pinus sylvestris* L. в Центральном районе Мурманской области.

Материалы и методы

Пробные площади заложены в хвойной тайге, находящейся на разных стадиях деградации – от дефолиации до ненарушенного контроля. Площадки располагались: в 12 км от горно-обогатительного комбината г. Ковдор, в 10 км от комбината Североникель (г. Мончегорск), в окрестностях пос. Ена (80 км от г. Мончегорска). Основными поллютантами комбината «Североникель» являются тяжелые металлы (никель, медь и их производные) и сульфаты. Ковдор является одним из самых запыленных городов области. Содержание пыли в воздухе в от-

дельные периоды превышает допустимые нормы в 10-17 раз. Основными источниками загрязнения являются пылящие хвостохранилища Ковдорского ГОКа, а также комбинат «Ковдорслюда» (Доклад о состоянии..., 1999). В качестве контроля проанализированы пробы, собранные в окрестностях п. Алакуртти, в 200 км от г. Мончегорска. Исследование развития популяций *P. sylvestris* на данных площадках проведены впервые.

Исследуемый материал собран в августе 1998 г. сотрудниками Института промышленной экологии Кольского НЦ РАН. Ветви срезались со взрослых деревьев *P. sylvestris*, из верхней части кроны, с помощью секатора, на участках общей площадью 100 м². Анализировали по 10 пар разновозрастной хвои сосны с 10 деревьев каждой пробной площади. Степень повреждения (наличие некроза, изменение окраски) определяли визуально. У хвои измеряли длину и различие между длиной двух игл в паре по методике М. В. Козлова (Kozlov, Niemela, 1999) под бинокулярной лупой МБС-9 с помощью окулярмикрометра. Анализировалась хвоя от 1 года до 8 лет, ее возраст устанавливался по мутовкам. На основе полученных измерений рассчитывали индекс флуктуирующей асимметрии. Под флуктуирующей асимметрией (ФА) мы понимаем случайное небольшое отклонение от симметрии по любому признаку двусторонне симметричного организма (органа) (Захаров, 1987). Величина флуктуирующей асимметрии оценивалась по формуле:

$$FA = 2 \times |WL - WR| / (WL + WR)$$

(по Palmer, Strobeck, 1986),

где WL – длина одной иглы в паре, WR – длина второй иглы в паре. В числителе разность берется по модулю (абсолютной величине). Первичные данные обработаны дисперсионным анализом. Статистическая обработка данных проводилась с помощью программы Excel 2000 (описательная статистика). Латинские названия растений приводятся по сводке С. К. Черепанова (1995).

Результаты и обсуждение

В ходе исследований выявлены значительные различия в морфологических показателях популяций *P. sylvestris* в Центральном районе Мурманской области. В окрестностях г. Мончегорска отмечены повреждения хвои сосны, произрастающей в зоне острого и хронического загрязнения комбинатом «Североникель». Из ви-

зуальных морфологических признаков это: появление точечности, некротические пятна, некроз кончиков игл, изменение окраски и снижение продолжительности жизни. У особой данной популяции, наблюдается преждевременное опадение хвои, продолжительность жизни которой составляет 3-4 года. Анализ хвои из нарушенных северотаежных сосняков Мурманской области (Ковдор-Енский район, пос. Алакуртти) показал, что продолжительность ее жизни достигает 6-8 лет (п. Алакуртти – 6 лет, п. Ена – 7 лет, г. Ковдор – 8 лет). На площадке, расположенной в зоне дефолирующих лесов в окрестностях г. Мончегорска, отмечены деформации ствола, веток и кроны сосен.

В ходе изучения морфологических параметров роста и развития хвои *P. sylvestris* были получены следующие результаты. Наибольшая длина хвои в контрольной популяции (200 км от комбината «Североникель»), диапазон варьирования показателя от 28,9 до 29,5 мм (табл. 1). По мере приближения к комбинату «Североникель» (г. Мончегорск), ее размеры уменьшаются. В пос. Ена (80 км от комбината «Североникель») величина хвои значительно меньше, чем в контроле, а в окрестностях Мончегорска, в зоне нарушенных лесных экосистем, ее длина минимальна от 22,4 до 22,8 мм (табл. 1) В окрестностях горно-обогатительного комбината г. Ковдор параметры хвои более близки к показателям контроля, особенно хвои первого года жизни, несмотря на то, что г. Ковдор является одним из самых запыленных городов в области. По данным В. Ф. Цветкова (1983) средняя величина хвои у сосны Кольской лесорастительной области колеблется в пределах от 24,5 до 32,4 (мм), таким образом, в окрестностях г. Мончегорска, ее значения ниже оптимальных, что свидетельствует об ингибировании роста хвои

выбросами комбината Североникель. Возрастной изменчивости по данному показателю в популяциях *P. sylvestris* не выявлено

При исследовании различий в длине хвои в паре у *P. sylvestris*, выявлена асимметрия у всех популяций сосен, при этом явно выражена тенденция ее увеличения по мере возрастания аэротехногенной нагрузки. Так, менее всего разница в длине пары хвоин выражена у сосен на контрольной площадке. Диапазон варьирования от 0,20 до 0,30 мм. В популяции сосны в пос. Ена значения асимметрии увеличиваются (табл. 2). Наибольшая асимметрия выявлена в окрестностях г. Мончегорска, диапазон варьирования показателя от 0,44 до 0,51 мм, что более чем в два раза превышает контрольные значения (табл. 2).

Полученные нами данные подтверждают результаты исследований М. Козлова и П. Ниемелы (Kozlov, Niemela, 1999), которые показали, что на удалении 15 км от комбината «Североникель» различие в длине хвои в паре у *P. sylvestris* в два раза больше по сравнению с участком, расположенным в 47 км от источника загрязнения. Сопоставление значений по данному показателю в популяции *P. sylvestris* около комбината Североникель (табл. 2) с данными, полученными М. Козловым в окрестностях медно-никелевого завода г. Харьявалта, на юго-западе Финляндии (Kozlov et al., 2002), свидетельствует о том, что уровень асимметрии в популяции сосны в Мурманской области значительно выше.

По данным М. Козлова (Kozlov et al., 2002) средняя разница в длине хвои в паре около завода в г. Харьявалта составила $0,317 \pm 0,007$ мм.

В популяции сосны из окрестностей г. Ковдор значения асимметрии близки к значениям из популяции п. Ена и значительно – в 1,5 раза меньше, чем в г. Мончегорске.

Таблица 1. Длина разновозрастной хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях техногенного загрязнения в Центральном районе Мурманской области (мм)

Место сбора	Хвоя			
	1-го года	2-го года	3-го года	4-го года
г. Мончегорск	22,4±0,33	22,6±0,230	22,8±0,38	22,5±1,08
п. Ена	24,0±0,06	24,5±0,440	25,0±0,61	25,0±0,50
п. Ковдор	28,5±0,50	27,9±0,600	26,1±0,50	26,3±0,60
п. Алакуртти *	29,5±0,23	29,4±0,007	29,1±0,40	28,9±0,22

Примечание. * – контрольная площадка.

Таблица 2. Различие в длине разновозрастной хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях техногенного загрязнения в Центральном районе Мурманской области (мм)

Место сбора	Хвоя			
	1-го года	2-го года	3-го года	4-го года
г. Мончегорск	0,50±0,02	0,44±0,02	0,44±0,01	0,50±0,03
п. Ена	0,30±0,02	0,30±0,01	0,34±0,02	0,40±0,02
п. Ковдор	0,28±0,01	0,30±0,02	0,25±0,02	0,40±0,01
п. Алакуртти *	0,20±0,03	0,30±0,02	0,23±0,01	0,26±0,01

Примечание. * – контрольная площадка.

Расчет индекса флуктуирующей асимметрии (ФА) хвои *P. sylvestris* в Центральном районе Мурманской области позволил выявить ее значительные различия между исследуемыми популяциями. Получено, что индекс ФА увеличивается по мере приближения к источнику загрязнения, что свидетельствует о возрастании нестабильности развития популяций. На удалении 200 км от источника загрязнения (п. Алакуртти) показатели флуктуирующей асимметрии у разновозрастной хвои минимальны (табл. 3). На удалении 80 км от комбината «Североникель» (п. Ена) выявлено увеличение индекса асимметрии. В окрестностях Ковдорского горно-обогатительного комбината индекс флуктуирующей асимметрии хвои аналогичен, при этом уровень ФА превышает аналогичный показатель в контроле на 20-27%.

Показатели флуктуирующей асимметрии имеют максимальные значения в районе г. Мончегорска, вблизи источника загрязнения и превышают значения контроля на 25-50%, что подтверждает наличие стрессового воздействия на популяцию сосны (табл. 3). Известно, что промышленные выбросы комбината Североникель распространяются на значительные расстояния (в радиусе, превышающем 60 км), являясь причиной нарушений и повреждений лесов, произрастающих на этой территории (Лукина, Никонов, 1998). Значительное увеличение показателя ФА в окрестностях медно-никелевого комбината может быть связано как с выбросами диоксида серы, так и с накоплением тяжелых металлов в почве, поскольку нарушения в раз-

витии являются неспецифической реакцией на стрессовые воздействия. Анализ результатов не позволяет сделать вывод о влиянии возрастной изменчивости хвои на уровень флуктуирующей асимметрии как в условиях загрязнения, так и в контроле.

Полученные данные подтвердили результаты аналогичных исследований, проведенных ранее М. Козловым и П. Ниемелой (Kozlov, Niemela, 1999) в окрестностях г. Мончегорска. Уровень флуктуирующей асимметрии хвои *P. sylvestris* увеличивался по мере приближения к источнику загрязнения. Данными авторами также было выявлено, что флуктуирующая асимметрия не зависит ни от возраста дерева, ни от положения ветви в пределах кроны, но возрастает с увеличением порядка ветвления (Kozlov, Niemela, 1999).

Установленные в ходе исследований нарушения в росте и развитии популяций сосны под воздействием аэротехногенного загрязнения комбинатов Североникель и Ковдорский ГОК, выражаются в уменьшении длины хвои, увеличении асимметрии в ее длине и возрастании индекса флуктуирующей асимметрии. При этом, следует отметить более локальный и менее стрессовый характер загрязнений предприятий г. Ковдор, поскольку у популяции сосны в данном районе менее выражены отклонения в росте и развитии хвои. В целом полученные данные свидетельствуют о нарушении стабильности развития популяций *P. sylvestris* в Центральном районе Мурманской области и могут быть использованы как показатели раннего обнаружения стресса.

Таблица 3. Величина флуктуирующей асимметрии (ФА) разновозрастной хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях техногенного загрязнения в Центральном районе Мурманской области (мм)

Место сбора	Хвоя			
	1-го года	2-го года	3-го года	4-го года
г. Мончегорск	0,0204±0,0004	0,0170±0,0008	0,0165±0,0002	0,0202±0,0020
п. Ковдор	0,0133±0,0006	0,0140±0,0011	0,0155±0,0011	0,0152±0,0007
п. Ена	0,0177±0,0012	0,0127±0,0007	0,0157±0,0006	0,0164±0,0006
п. Алакуртти*	0,0097±0,0001	0,0127±0,0008	0,0126±0,0004	0,0123±0,0008

Примечание. * – контрольная площадка.

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору, доктору биологических наук Н. В. Лукиной за предоставление материала для исследований и консультации, доценту Университета Турку (Финляндия) М. В. Козлову за конструктивные предложения и замечания при обсуждении результатов исследований.

Литература

- Василевская Н. В., Лукина Ю. М. Флуктуирующая асимметрия листьев *Betula pubescens ssp. subarctica* Orlova, как интегральный показатель качества среды г. Мурманска // Ботанические проблемы регионального природопользования. Рязань, 2001. С. 15-17.
- Доклад о состоянии окружающей природной среды Мурманской области в 1998 году. Мурманск, 1999. 200 с.
- Захаров В. М. Асимметрия животных. М.: Наука, 1987. 161 с.
- Захаров В. М., Чистякова Е. К., Кряжева Н. Г. Гомеостаз развития как общая характеристика состояния организма: скоррелированность морфологических и физиологических показателей у березы повислой // Доклады Академии Наук. Общая биология. 1997. Т. 357. № 26. С. 1-3.
- Захаров В. М., Чубинишвили А. Т., Дмитриев С. Г., Баранов А. С., Борисов В. И., Валецкий А. В., Крысанов Е. Ю., Кряжева Н. Г., Пронин А. В., Чистякова Е. К. Здоровье среды: практика оценки. М.: Центр экологической политики России, 2000. 317 с.
- Кряжева Н. Г., Чистякова Е. К., Захаров В. М. Анализ стабильности развития березы повислой в условиях химического загрязнения // Экология. 1996. № 6. С. 441-444.
- Кузьмин А. В., Жиров В. К., Исаков В. Н. Статистические закономерности морфогенеза листа в условиях неоднородной среды // Экология. 1989. № 5. С. 68-70.
- Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты, 1998. 310 с.
- Нефедова Т. А., Николаева Л. Ф., Кавтарадзе Д. Н. Влияние городской среды на флуктуирующую асимметрию и фотоассимилирующий аппарат *Betula pendula* Roth. // Вестник МГУ. 2002. Серия 16, Биология. № 3. С. 29-30.
- Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. С-Пб.: Мир и семья, 1995. 990 с.
- Чубинишвили А. Т. Гомеостаз развития в популяциях озерной лягушки (*Rana ridibunda* Pall.), обитающих в условиях химического загрязнения // Экология. 1998. № 1. С. 71-74.
- Шержукова Л. В., Кривцова А. Н., Мелузова М. И., Мишаленкова Ю. Н. Оценка стабильности развития липы мелколистной на заповедной и урбанизированной территориях // Онтогенез. 2002. Т. 33. № 1. С. 16-18.
- Цветков В. Ф. Леса на краю Земли. Мурманск, 1983. 160 с.
- Freeman D. C., Graham J. H., Emlen J. M. Developmental stability in plants: symmetries, stress and epigenesis. // Developmental instability: its origin and evolutionary implications. 1994. P. 99-122.
- Freedman B. Environmental Ecology. The Impact of Pollution and Other Stresses on Ecosystem Structure and Function. NY: Acad. Press, 1989. 310 p.
- Kozlov M. V., Wilsey B. J., Koricheva J., Haukioja E. Fluctuating asymmetry of birch leaves increases under pollution impact // Journal of Applied Ecology. 1996. V. 33. P. 1489-1495.
- Kozlov M. V., Niemela P. Difference in needle length – a new and objective indicator of pollution impact on Scotch pine (*Pinus sylvestris*) // Water, Air and Soil pollution. 1999. V. 116. P. 365-370.
- Kozlov M. V., Zvereva E. L., Niemelä P. Shoot fluctuating asymmetry - a new and objective stress index in Norway spruce (*Picea abies*) // Can. J. Forest Res. 2001. V. 31. P. 1289-1291.
- Kozlov M. V., Niemelä, P., Junttila J. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // Ecological Indicators. 2002. V. 1. P. 271-277.
- Palmer A.R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry measurement, analysis, patterns // Annual Review of Ecology and Systematics. 1986. V. 17. P. 391-421.
- Zvereva E. L., Kozlov M. V., Haukioja E. Stress responses of *Salix borealis* to pollution and defoliation. // Journal of Applied Ecology. 1997a. V. 34. P. 1387-1396.
- Zvereva E., Kozlov M., Niemela P., Haukioja E. Delayed induced resistance and increase in leaf fluctuating asymmetry as responses of *Salix borealis* to insect herbivory // Oecologia. 1997b. V. 102. P. 368-373.
- Valkama J., Kozlov M. V. Variation in fluctuating asymmetry of mountain birch: is cold spring more stressful than pollution? // J. Appl. Ecol. 2001. V. 38. P. 665-673.