

Прогноз восстановления напочвенного покрова в сосновом лесу с давностью пожара 65 лет при искусственном загрязнении полиметаллической пылью

Горшков В. В., Баккал И. Ю., Лянгузова И. В., Баркан В. Ш.

В условиях 20-летнего полевого эксперимента, заложенного в лишайниковом сосновом лесу на Кольском полуострове, изучено влияние загрязнения полиметаллической пылью на состояние травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов в интервале индекса техногенной нагрузки (П) от 2 до 86 относительных единиц. Параметры травяно-кустарничкового яруса и его сукцессионный статус не меняется в исследованном интервале индекса. При $P \leq 10$ отн. ед. мохово-лишайниковый ярус развивается нормально. В интервале индекса $P = 20-30$ отн. ед. прогнозная оценка задержки восстановления яруса составляет 50—70 лет; при $P > 30$ отн. ед. она может превышать 200 лет.

Ключевые слова: *тяжелые металлы, напочвенный покров, кустарнички, лишайники, мохообразные, постпирогенная восстановительная сукцессия, северная тайга, Кольский полуостров.*

Prognosis of Dwarf-shrub and Lichen Layers Development in Northern Taiga Pine Forests under Artificial Pollution by Polymetallic Dust

V. V. Gorshkov, I. Y. Bakkal, I. V. Lyanguzova, V. S. Barcan

Environmental pollution by polymetallic dust slows down the rate of post-fire recovery succession of moss-lichen layer in northern taiga pine forests. In case the technogenic load index (P) is ≤ 10 related units there are no disturbances. With the interval between 10 and 30 rel. units the expected delay of complete layer recovery as compared with the control may last 50—70 years. With the index of $P > 30$ rel. units the process of post-fire succession is totally disturbed and the layer recovery will depend on how fast the soil will get cleared of heavy metals; in this case the recovery delay is expected to last longer than 200 years. The state of the dwarf-shrub layer under the same values of P is not changed.

Keywords: *heavy metals, on-soil vegetation, dwarf-shrubs, lichens, mosses, post-fire recovery succession, northern taiga, Kola peninsula.*

Введение

Напочвенный покров — неотъемлемая часть экосистем северотаежных лесов, одной из основных функций которого является выравнивание теплового и водного режима верхних биологически активных горизонтов почвы и обеспечение стабильных условий для разложения органического вещества и поглощения минеральных веществ корнями растений. В сосновых лесах главную средообразующую функцию на всех этапах сукцессий выполняет мохово-лишайниковый ярус. В сосновых лесах лишайникового типа наиболее быстро восстанавливаются параметры травяно-кустарничкового яруса — проективное покрытие и видовая структура восстанавливается в период до 30 лет после пожара. Наиболее длительный период занимает процесс восстановления мохово-лишайникового яруса. В первые 5–10 лет после пожара покров составляют первичные слоевища видов рода *Cladonia* и *Trapeliopsis granulosa* и раннесукцессионные виды мхов рода *Polytrichum*. До 40 лет после пожара в покрове содоминируют шиловидные, бокальчатые и кустистые лишайники рода *Cladonia*. Основным доминантом яруса в период 50–60 лет после пожара является *Cladina mitis*, при давности пожара 80–90 лет — *Cladina rangiferina*. Завершается восстановление покрова через 120–140 лет, когда основным доминантом становится климаксовый вид *Cladina stellaris* [3, 5, 6].

Одной из наиболее серьезных проблем современного мира остается антропогенное загрязнение окружающей среды, несмотря на предпринимаемые многими странами усилия по снижению эмиссии в атмосферу загрязняющих веществ. В состав атмосферных выбросов предприятий черной и цветной металлургии входят, в основном, диоксид серы и тяжелые металлы, в результате комплексного воздействия которых происходит разрушение растительных сообществ, вплоть до образования техногенных пустошей [1, 2, 6–9]. Однако в условиях аэротехногенного загрязнения окружающей среды сернистым ангидридом совместно с полиметаллической пылью невозможно разделить токсическое воздействие диоксида серы и тяжелых металлов на лесные экосистемы. В связи с этим в фоновом районе Кольского полуострова был заложен полевой эксперимент по изучению влияния тяжелых металлов на растительные сообщества и почвы.

Целью данной работы является оценка воздействия загрязнения местообитания полиметаллической пылью на скорость послепожарной восстановительной сукцессии напочвенного покрова северотаежных сосновых лесов.

Материал и методы

Полевой эксперимент был начат в 1992 г. на территории фонового района, удаленного от комбината «Североникель» (г. Мончегорск) на расстояние свыше 80 км. В сосняке лишайниковом (давность последнего пожара 66 лет) была заложена пробная площадь (67°51'00" с.ш., 31°24'30" в.д.) общей площадью 0,2 га. Древесный ярус сложен преимущественно послепожарными деревьями, средняя высота которых составляла 10 м, средний диаметр — 9,0 см, общая сумма площадей сечений деревьев, выросших до и после пожара составляла 13,5 м²/га. Одна половина пробной площади была оставлена в качестве контроля. За период 1992—1997 гг. на поверхность напочвенного покрова второй половины пробной площади вручную было рассеяно 43,3 кг полиметаллической пыли, отобранной с электрофильтров цеха рудной электроплавки комбината «Североникель».

В 1992 и 2007 гг. параметры травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов (общее проективное покрытие каждого яруса, проективное покрытие и высота видов) на контрольном и экспериментальном участках измеряли на 20 постоянных учетных площадках размером 1×1 м, расположенных блоками по четыре в регулярном порядке через 7 м вдоль параллельных трансект [10].

Рассыпание пыли привело к пространственно неравномерному повреждению и разрушению напочвенного покрова. В связи с этим, в 2011 г. было заложено 50 учетных площадок размером 50×50 см на участках с различной степенью разрушения мохово-лишайникового яруса: 0–10, 11–30, 31–60, 61–80, 81–100% (по 10 площадок на каждую градацию). На всех учетных площадках были проведены измерения проективного покрытия и высоты видов высших растений, мхов и лишайников и отобраны образцы органогенного горизонта Al-Fe-подзолистой почвы. Анализ кислоторастворимых форм Ni, Cu, Co (вытяжка 1,0 н HCl) в образцах почвы проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии в 3-х кратной повторности. Для каждой учетной площадки был рассчитан индекс техногенной нагрузки (И), представляющий собой превышение суммарной концентрации кислоторастворимых форм Ni, Cu и Co в органогенном горизонте почвы загрязненного участка над их фоновым содержанием в том горизонте почвы.

При статистической обработке результатов использовали корреляционный, линейный регрессионный и однофакторный дисперсионный анализы.

Результаты и обсуждение

Динамика напочвенного покрова на постоянных учетных площадках за период 1992—2007 гг.

На контрольном участке среднее содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в органогенном горизонте почвы составляло: Ni — $6,7 \pm 0,1$, Cu — $9,5 \pm 0,1$, Co — $1,1 \pm 0,1$ мг/кг подстилки и достоверно не различалось в 1992 и 2007 гг. На экспериментальном участке в 2007 г. средние концентрации кислоторастворимых форм Ni, Cu и Co составляли соответственно 140, 280 и 6 мг/кг почвы, при этом среднее значение индекса техногенной нагрузки было равно 26,4 отн. ед.

На контрольном участке за анализируемый период достоверного изменения общего покрытия травяно-кустарничкового яруса не зарегистрировано (табл. 1), в то же время достоверно уменьшилось покрытие некоторых видов: *Vaccinium vitis-idaea* L., *Empetrum hermaphroditum* Hagerup и *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng.

Таблица 1 — Динамика среднего проективного покрытия (%) основных видов напочвенного покрова на контрольном и экспериментальном участках

Ярус, вид	Контрольный участок		Экспериментальный участок	
	Год наблюдений			
	1992	2007	1992	2007
Травяно-кустарничковый ярус, общее	10,5	7,3	10,1	16,2**
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	4,6	2,4*	2,7	5,5
<i>Vaccinium myrtillus</i>	0,1	0,2	0,1	2,0
<i>Empetrum hermaphroditum</i>	3,9	0,9*	5,0	5,6
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	0,6	0,0*	0,3	0,1
<i>Calluna vulgaris</i>	0,9	3,9	1,9	2,8
Лишайники, общее	84,6	85,5	75,2	63,8**
<i>Cladina mitis</i>	46,0	27,9**	34,0	21,3***
<i>Cladina rangiferina</i>	15,5	34,0***	16,5	28,2***
<i>Cladina stellaris</i>	4,3	12,3***	7,0	6,8

<i>Cladonia uncialis</i>	13,4	8,1*	12,4	3,8***
<i>Cladonia deformis</i>	0,1	0,0	0,3	0,2
<i>Cladonia gracilis</i>	0,5	0,3	0,5	0,4
<i>Cladonia crispata</i>	1,6	1,7	1,4	1,5
<i>Cladonia cornuta</i>	1,0	0,3**	1,2	0,7*
<i>Cladonia coccifera</i>	0,3	0,0**	0,0	0,0
<i>Trapeliopsis granulosa</i>	0,3	0,0*	0,0	0,0
<i>Stereocaulon paschale</i>	1,5	0,1*	0,2	0,5
Мохообразные, общее	4,4	2,7	6,8	1,3**
<i>Pleurozium schreberi</i>	1,5	2,5	4,2	0,5*
<i>Dicranum scoparium</i>	0,4	0,0	0,6	0,0*
<i>Polytrichum piliferum</i>	1,6	0,0**	0,5	0,1**
<i>Pohlia nutans</i>	0,1	0,0	0,3	0,5

*, **, *** – различия (между значениями 1992 и 2007 г.) достоверны при уровне значимости 0,05; 0,01; 0,001 соответственно.

Общее проективное покрытие мохово-лишайникового яруса и общее покрытие лишайников достоверно не изменилось. Однако, зарегистрировано перераспределение долей участия видов. Отмечено значительное увеличение проективного покрытия доминанта мохово-лишайникового яруса сообществ лишайникового типа с давностью пожара 80–90 лет — *Cladina rangiferina* (L.) Nyl. и климаксового вида — *Cladina stellaris* (Opiz.) Brodo. Кроме того, произошло существенное снижение покрытия доминантных видов промежуточных стадий сукцессии — *Cladina mitis* (Sandst.) Hustich и *Cladonia uncialis* (L.) Weber ex Wigg., а также покрытия некоторых раннесукцессионных видов мхов и лишайников (*Cladonia cornuta* (L.) Hoffm., *C. coccifera* (L.) Willd., *Polytrichum piliferum* Hedw.), накипного лишайника *Trapeliopsis granulosa* (Hoffm.) Lumbsch. и кустистого лишайника *Stereocaulon paschale* (L.) Hoffm., вплоть до полного их исчезновения (табл. 1). Такие изменения проективного покрытия, как отдельных видов, так и ярусов напочвенного покрова характерны для промежуточной стадии (давность пожара 60–80 лет) постпирогенной сукцессии северотаежных сосновых лесов лишайникового типа [3, 5].

За тот же период на экспериментальном участке зарегистрировано достоверное увеличение общего покрытия травяно-кустарничкового яруса, однако достоверного увеличения покрытия конкретных видов не зарегистрировано (табл. 1).

При данном среднем уровне загрязнения полиметаллической пылью отмечено незначительное нарушение в развитии мохово-лишайникового яруса по сравнению с контролем: достоверно уменьшилось общее покрытие лишайников и мохообразных (табл. 1). Следует отметить, что в отличие от контрольного, на экспериментальном участке за 15-летний период не произошло увеличения покрытия климаксового вида *Cladina stellaris*. Кроме того, более резко снизилось покрытие *Cladonia uncialis* и сократилось проективное покрытие *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. Средняя высота доминантов лишайникового покрова (*Cladina rangiferina*, *Cl. mitis* и *Cladina stellaris*) снизилась с 8 до 4 см.

Таким образом, загрязнение местообитания тяжелыми металлами (суммарная концентрация кислоторастворимых форм Ni, Cu, Co в среднем составляла 425 мг/кг почвы) привело к незначительным дигрессивным процессам в напочвенном покрове экспериментального участка и замедлению скорости восстановительной сукцессии. Аналогичные процессы отмечаются и в буферной зоне, при соответствующих концентрациях тяжелых металлов в подстилке [4, 6].

Анализ состояния напочвенного покрова на площадках, заложенных по градиенту степени нарушенности мохово-лишайникового яруса на экспериментальном участке

На учетных площадках экспериментального участка индекс техногенной нагрузки варьировал в интервале 2,3–85,8 отн. ед., что соответствует суммарной концентрации кислоторастворимых форм Ni, Cu и Co от 36,5 до 1390 мг/кг подстилки.

В пределах анализируемой выборки по градиенту степени нарушенности мохово-лишайникового яруса общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса и покрытие конкретных видов варьируют в узком диапазоне и достоверно не изменяются (табл. 2). Коэффициенты корреляции между проективным покрытием видов и содержанием тяжелых металлов в подстилке незначимы, $r = -(0,15-0,21)$, $P > 0,05$.

Таблица 2 — Проективное покрытие (%) видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов на учетных площадках экспериментального участка

Ярус, вид	Градации общего проективного покрытия мохово-лишайникового яруса на учетных площадках, %				
	0–10	11–30	31–60	61–80	81–100
	Среднее значение индекса техногенной нагрузки, отн. ед.				
	58,9	26,4	19,5	14,9	10,0
Травяно-кустарничковый ярус, общее	6,7±1,4	16±3,7	12±3,5	13±3,2	8,5±1,8
<i>Empetrum hermaphroditum</i>	1,0±0,3	5,6±2,5	4,8±2,3	1,3±0,6	0,9±0,6
<i>Vaccinium myrtillus</i>	0	1,4±1,3	0	1,5±1,4	0,3±0,3
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	4,5±1,0	5,4±1,2	5,6±1,3	8,3±2,0	5,1±1,2
Лишайники, общее	14,8±3,5	30,4±3,3	55,5±3,6	70,8±2,7	84,6±2,7
<i>Cladina mitis</i>	2,1±0,5	7,4±2,0	9,7±2,0	13,3±1,9	22,5±4,6
<i>Cladina rangiferina</i>	1,4±0,5	6,5±1,9	20,7±3,2	32,7±1,7	32,9±5,5
<i>Cladina stellaris</i>	0,8±0,3	3,3±0,6	7,5±1,8	12,4±2,3	18,2±4,4
<i>Cladonia uncialis</i>	0,9±0,5	1,0±0,3	5,2±1,4	6,2±1,3	9,0±2,5
<i>Cladonia cornuta</i>	0,8±0,3	2,6±1,3	1,1±0,3	1,2±0,7	0,3±0,1
<i>Cladonia crispata</i>	0,3±0,1	1,8±0,4	2,8±0,9	1,4±0,2	1,0±0,2
<i>Cladonia deformis</i>	0,7±0,2	1,2±0,8	0,5±0,2	0,2±0,1	0
<i>Cladonia gracilis</i>	1,3±0,5	0,6±0,2	0,7±0,3	0,7±0,3	0,1
<i>Cladonia spp.1</i>	7,6±2,0	5,6±1,3	5,1±1,4	1,6±1,0	0
<i>Trapeliopsis granulosa</i>	0	0,8±0,6	0,5	0,1	0
Мохообразные, общее	1,6±0,6	2,5±1,0	0,8±0,3	3,1±1,4	3,6±0,9
<i>Dicranum scoparium</i>	0	0,4±0,1	0,8±0,6	0	0
<i>Hepatica spp. 2</i>	1,1±0,2	2,4±0,6	1,2	3,6±1,3	3,1±0,7
<i>Pleurozium schreberi</i>	0	2,2±1,3	0,3±0,1	0,4±0,1	0

<i>Pohlia nutans</i>	1,4±0,7	1,7±0,9	0,9±0,7	2,0±1,2	1,2±0,4
<i>Polytrichum piliferum</i>	1,0	0,1	0,1	0,9±0,7	1,3±0,5

1 – неидентифицируемые до вида первичные слоевища лишайников;

2 – печеночные мхи.

Общее проективное покрытие мохово-лишайникового яруса на учетных площадках экспериментального участка варьирует в широких пределах — от 1,5 до 97%. При индексе техногенной нагрузки $\Pi \leq 10$ отн. ед. мохово-лишайниковый ярус развивается нормально: проективное покрытие варьирует от 67 до 97% и в среднем составляет $88 \pm 3\%$, высота яруса составляет 8–10 см. В интервале индекса техногенной нагрузки $\Pi = 10–30$ отн. ед. — ярус нарушен в разной степени: проективное покрытие варьирует от 24 до 92% и в среднем составляет $60 \pm 4\%$, высота яруса — 4–8 см. При $\Pi > 30$ отн. ед. — ярус разрушен: проективное покрытие варьирует от 1,5 до 33% и в среднем составляет $16,5 \pm 3,2\%$, средняя высота яруса — 1–2 см. Зависимость общего проективного покрытия мохово-лишайникового яруса от индекса техногенной нагрузки можно аппроксимировать линейным регрессионным уравнением (коэффициенты уравнения: 80,5 и -1,06, $r = -0,76$, $P = 0,000$) (рис. 1).

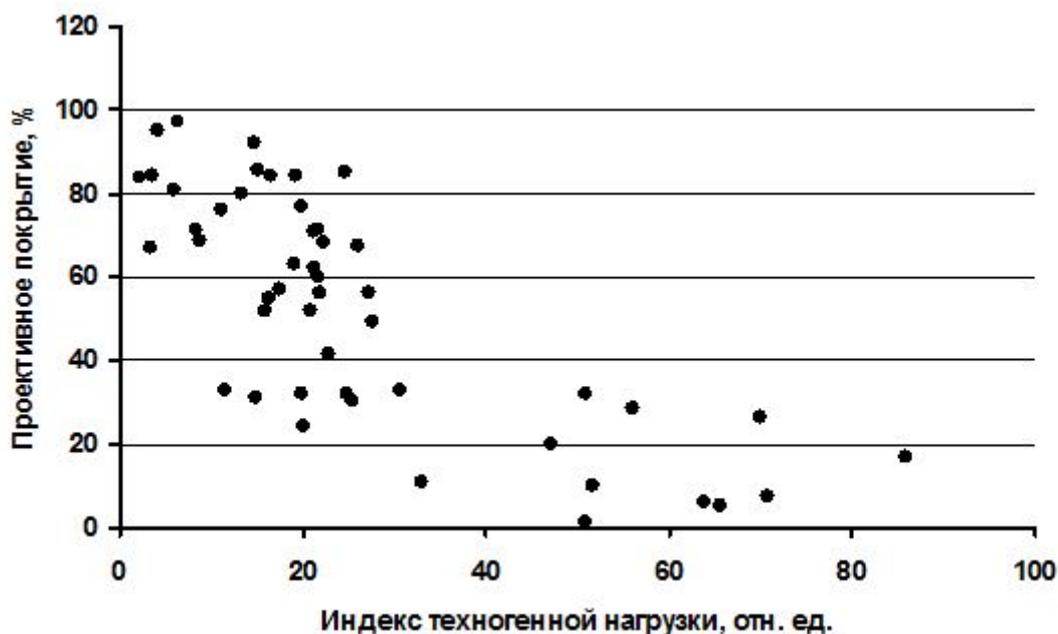


Рисунок 1 — Зависимость проективного покрытия мохово-лишайникового яруса от индекса техногенной нагрузки на экспериментальном участке

Между индексом техногенной нагрузки и общим проективным покрытием лишайников, а также покрытиями лишайников *Cadina mitis*, *Cl. rangiferina*, *Cl. stellaris*, *Cladonia uncialis* существует значимая отрицательная связь, коэффициенты корреляции варьируют от -0,40 до -0,71 ($P < 0,05$). Проективное покрытие первичных слоевищ лишайников положительно скоррелировано с индексом техногенной нагрузки ($r = 0,51$, $P < 0,000$) Для остальных видов лишайников и всех видов мохообразных такая связь отсутствует.

Оценка проективного покрытия основных видов лишайникового покрова и мохово-лишайникового яруса в целом на учетных площадках экспериментального участка показала, что при индексе техногенной нагрузки $II \leq 10$ отн. ед. состояние яруса соответствует таковому в контроле при давности пожара 80 лет. Его полное восстановление произойдет через 40–60 лет, когда давность пожара достигнет 120–140 лет. При индексе техногенной нагрузки $II \sim 15$ отн. ед. наблюдается незначительное угнетение мохово-лишайникового яруса, проявляющееся в снижении общего проективного покрытия лишайников с 84 до 72%. В интервале индекса техногенной нагрузки $II = 20–30$ отн. ед. мохово-лишайниковый ярус по общему проективному покрытию соответствует таковому при давности пожара 10–15 лет, а по суммарному проективному покрытию видов рода *Cladina* — давности пожара 30–50 лет. В этих условиях полное восстановление яруса может произойти через 100–120, т. е. задержка восстановления по сравнению с контролем составит 50–70 лет. При индексе техногенной нагрузки $II > 30$ отн. ед. состояние яруса соответствует начальному этапу послепожарного восстановления покрова (давность пожара 5 лет). В этих условиях ход постпирогенной сукцессии полностью нарушен, и восстановление яруса будет зависеть от скорости самоочищения почвы от тяжелых металлов. Как было показано ранее [6], снижение индекса техногенной нагрузки от $II \sim 60$ до $II \leq 10$ отн. ед. займет приблизительно 125 лет. В связи с этим прогнозируемое полное восстановление параметров мохово-лишайникового яруса сосновых лесов лишайникового типа при индексе техногенной нагрузки $II > 30$ отн. ед. составит более 200 лет.

Заключение

В результате 20-летнего полевого эксперимента по искусственному загрязнению полиметаллической пылью напочвенного покрова лишайниковых сосновых лесов лишайникового типа на Кольском

полуострове выявлены пороговые значения индекса техногенной нагрузки, вызывающие различную степень нарушения напочвенного покрова от незначительного нарушения до полного разрушения. При индексе техногенной нагрузки $II \leq 10$ отн. ед. мохово-лишайниковый ярус развивается нормально, и его полное восстановление произойдет через 40–60 лет, когда давность пожара достигнет 120–140 лет. В интервале индекса техногенной нагрузки $II = 20–30$ отн. ед. мохово-лишайниковый ярус существенно нарушен и его полное восстановление может произойти через 100–120 лет. При индексе техногенной нагрузки $II > 30$ отн. ед. ход постпирогенной сукцессии мохово-лишайникового яруса полностью нарушен, и процесс его полного восстановления может занять свыше 200 лет. Параметры травяно-кустарничкового яруса как на контрольном, так и на экспериментальном участках, соответствуют стационарным величинам, и его сукцессионный статус не меняется в интервале индекса техногенной нагрузки от 2 до 86 отн. ед.

Благодарности

Работа поддержана Программой ОБН РАН «Биоресурсы», грантом РФФИ № 11-04-01664а.

Список литературных источников

1. Баркан В. Ш. Загрязнение почвы никелем и медью от промышленного источника металлургических пылей// Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» Апатиты, 2008. Т. 1. — С. 46–51.
2. Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова//Л. Изд-во АН СССР, 1990. — 195 с.
3. Горшков В. В. Характеристики восстановления лесных экосистем после пожаров//ДАН России. 1993. Т. 333. № 6. — С. 111–114.
4. Горшков В.В., Баккал И. Ю. Динамика напочвенного покрова сосновых лесов фоновых и загрязненных районов Кольского полуострова с 1992 по 2007 гг.//Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Экологические

- проблемы северных регионов и пути их решения» Апатиты, 2008. Т. 1. — С. 11–12.
5. Горшков В.В., Баккал И. Ю. Особенности послепожарной восстановительной динамики сообществ с доминированием лишайников // Изв. Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14, № 1(5). — С. 1223–1227.
 6. Динамика лесных сообществ Северо-Запада России//СПб. Изд-во ВВМ, 2009. — 276 с.
 7. Дончева А. В. Ландшафт в зоне воздействия промышленности //М., 1978. — 95 с.
 8. Лукина Н.В., Никонов В. В. Состояние еловых биогеоценозов Севера в условиях техногенного загрязнения//Апатиты. Изд-во КНЦ РАН, 1993. — 134 с.
 9. Лукина Н.В., Черненькова Т. В. Техногенные сукцессии в лесах Кольского полуострова // Экология. 2008. № 5. — С. 329–337.
 10. Методы изучения лесных сообществ//СПб. Изд-во НИИХимии СПбГУ, 2002. — 240 с.