

УДК 630*228; 630*18; 630*181

ИЗРЕЖИВАНИЕ ДРЕВОСТОЕВ КРАСНОЯРСКОГО ЗАПОЛЯРЬЯ В РАЗНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

© 2014 г. В. И. Поляков

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

Поступила в редакцию 20.09.2014 г.

В 2001 г. в лесных насаждениях разной степени нарушенности промышленными выбросами Норильского горно-металлургического комбината заложили 6 постоянных пробных площадей (ПП). В 2004 г. на ПП провели повторную таксацию для оценки влияния загрязнения на изменение состояния древостоев. При этих учетах на ПП у каждого дерева визуально определили категорию состояния по 6-балльной шкале «Санитарных правил в лесах Российской Федерации». Учитывали также переход в валеж за трехлетний период. Разработали две модели изреживания древостоев в разных экологических условиях с использованием цепей Маркова: с помощью оценки вероятности выживания деревьев за 3 года и на основе оценки матриц вероятности изменения категории состояния деревьев за этот же период. Определили число деревьев, погибших с 1979 г., когда был введен в строй комбинат «Надежда». Это было сделано с помощью оценки вероятности сохранения сухостоя на корню за 3 года наблюдения. Сделали прогноз развития ситуации до 2030 г. С помощью логит-регрессии оценили вероятность выживания деревьев в зависимости от четырех факторов: степени повреждения древостоев поллютантами, породы, местоположения древостоя в рельефе и возраста. Результаты позволили отделить влияние загрязнения на устойчивость древостоев от прочих факторов. Выявили долю отпада деревьев, обусловленную загрязнением. Определили шкалу снижения газоустойчивости пород к SO₂: береза → ель → лиственница. У лиственницы доля отпада, вызванная загрязнением, оказалась самой высокой.

Ключевые слова: загрязненные древостои, ландшафт, вероятность выживания деревьев, отпад, прогноз, реконструкция, цепи Маркова, матрицы, логит-регрессия, шкала категорий состояния, Красноярское Заполярье, Таймыр.

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия предтундровые леса юга Таймыра претерпели значительную антропогенную трансформацию, связанную с длительным техногенным загрязнением природной среды предприятиями ОАО ГМК «Норильский никель»¹. Подавляющая часть промышленных выбросов представлена диоксидом серы (SO₂ – 96 %) – наиболее агрес-

сивным для древесной растительности (Алексеев, 1987; Менщиков, 2004; Цветков В., Цветков И., 2003). Предприятия ежегодно выбрасывают в атмосферу около 2.4 млн т SO₂, что превышает выбросы этого газа в атмосферу всех стран Западной Европы.

Поллютанты переносятся на большие расстояния, особенно по направлению господствующих ветров (до 200 км и более к югу и юго-востоку от Норильска). В результате равнинные леса в окрестностях Норильска вплоть до Хантайского водохранилища большей частью погибли (345 тыс. га), а прилегающие к ним горные леса западного макросклона плато Путорана и восточной части хр. Лонтокойский Камень на площади 1475 тыс. га характеризуются повреждениями разной степени (от слабых до умеренных

¹ Норильский горно-металлургический комбинат им. А. П. Завенягина введен в строй в 1936 г. В 50-е гг. XX в. открыты крупнейшие рудные месторождения в нижнем течении рек Талнах и Хараелах, а с 1979 г. начал работу многопрофильный комбинат «Надежда», в состав которого сегодня входят три плавильных завода, две обогатительные фабрики, карьеры и рудники.

и сильных). Признаками техногенной нарушенности лесного покрова служат повышенная встречаемость сухостоя основных лесобразующих пород: лиственницы, ели и березы, химические ожоги хвои и листьев древесных и кустарниковых растений, угнетение и отмирание мхов, лишайников, многих видов кустарников и кустарничков, трансформация биологического разнообразия и направленности сукцессионных смен (Менщиков, 1991, 2004; Поляков и др., 2003, 2005а, б; Савченко, 1998; Харук и др., 1995, 1996; Цветков В., Цветков И., 2003). Накопление дозы поллютантов, изменение жизненного состояния деревьев и замедление ростовых процессов в насаждениях с определенного момента вызывают ощутимое повышение темпа изреживания древостоев (Алексеев, 1987; Алексеев, Карпенко, 1985; Менщиков, 2004; Цветков В., Цветков И., 2003). Так, с начала 80-х гг. XX в. в зонах умеренного и сильного загрязнения на Кольском п-ове темпы отмирания сосны и ели последовательно возрастали, а численность живых деревьев падала (Цветков В., Цветков И., 2003). Однако методы наземного мониторинга древостоев (Алексеев, 1987; Алексеев, Карпенко, 1985; Менщиков, 2004; Цветков В., Цветков И., 2003) пока что несовершенны и не позволяют оценить достоверно, например, долю отпада, обусловленную загрязнением, и газоустойчивость древесных пород.

Цель работы – изучение отпада и динамики изменения состояния деревьев в нарушенных промышленным загрязнением и фоновых древостоях юга Таймыра, исследование марковских моделей изреживания древостоев в разных экологических условиях и выработка методов оценки влияния промышленного загрязнения на изменение состояния древостоев.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Программа экологических исследований по комплексной оценке состояния и мониторингу природной среды в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района (НПР), начатых Институтом леса им. В. Н. Сукачева СО РАН в 2001 г., вклю-

чала изучение отклика насаждений на загрязнение во времени и пространстве. Для реализации этой программы в 2001–2004 гг. заложено 55 постоянных пробных площадей (ПП) на 22 ключевых участках с охватом территории в меридиональном направлении до 400 и в широтном – до 200 км. Работы по закладке и таксации ПП выполнялись в соответствии с требованиями ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки» (1983). Все деревья были пронумерованы (прикреплена металлическая бирка с номером) и обмерены. Для характеристики жизненного состояния деревьев на ПП определяли их категорию. По шкале действующих «Санитарных правил в лесах Российской Федерации» (Санитарные правила..., 1998) к I категории относятся деревья без признаков ослабления, ко II – ослабленные, к III – сильно ослабленные, к IV – усыхающие, к V – сухой текущий год и к VI – сухой прошлых лет. Категорию состояния древостоя устанавливали как средневзвешенную по объему стволов. Деревья, упавшие за период 2001–2004 гг., регистрировали как валеж.

Объектами исследований послужили шесть из 55 постоянных ПП, заложенных в 2001 г. и повторно обмеренных в 2004 г. Две из них находятся в фоновых древостоях на ключевом участке «Горбиачин» в 200 км южнее источника загрязнения, две – в умеренно нарушенных древостоях на ключевом участке «Ирбэ» и две – в сильно нарушенных древостоях на ключевом участке «Тукуланда». Ключевые участки «Ирбэ» и «Тукуланда» находятся в 129 и 100 км юго-восточнее и южнее Норильска соответственно. Все участки расположены по направлению преобладающих ветров со стороны Норильска. Во всех случаях это смешанные высоковозрастные березово-елово-лиственничные древостои IV и V классов бонитета с полнотой 0.3–0.6 и запасом растущего леса 50–130 м³га⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение относительного числа деревьев по категориям жизненного состояния в нарушенных загрязнением древостоях заметно отличалось от такового в фоновых (рис. 1).

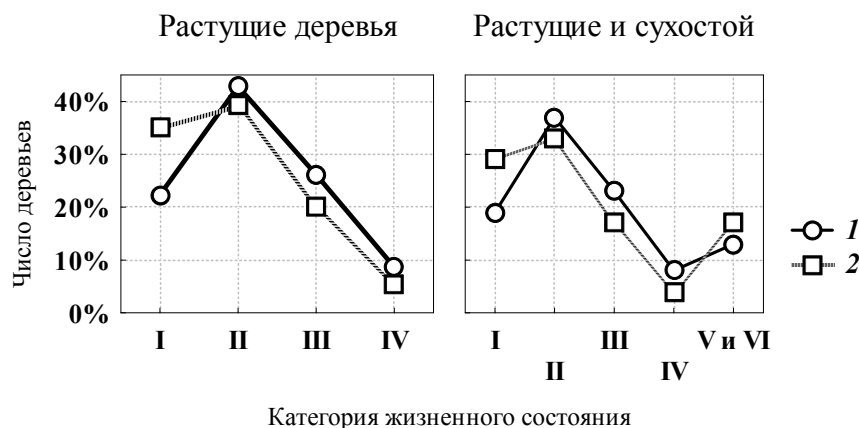


Рис. 1. Распределение лиственницы по категориям жизненного состояния: 1 – в фоновых древостоях на ключевом участке «Горбачин»; 2 – в нарушенных загрязнением древостоях на ключевых участках «Ирбэ» и «Тукуланда».

В фоновых древостоях доля ослабленных деревьев II, III и IV категорий больше, чем в нарушенных, а относительное число деревьев I категории и сухостоя V и VI категорий меньше. Отмеченные закономерности соответствуют адаптационному синдрому расте-

ний, вызываемому стрессирующим фактором (Пахомова, 1995), – гибель ослабленных деревьев, усиление защитной активности оставшихся в живых и компенсационный рост ассимиляционного аппарата деревьев загрязненного древостоя.

Таблица 1. Отпад на ПП вследствие усыхания и фактическая вероятность выживания деревьев при разной степени нарушенности древостоев

Степень нарушенности древостоев	Тип леса	Местоположение	Порода	Количество растущих деревьев в 2001 г.	Отпад к 2004 г.		Вероятность выживания за 1 год
					шт.	%	
Фоновые	Лиственничник ерничково-лишайниковый	Шлейф коренного склона	Б	2	–	–	1.000
			Е	42	–	–	1.000
			Л	138	–	–	1.000
	Лиственничник зеленомошно-лишайниковый	Средняя часть коренного склона	Б	153	4	2.6	0.991
Е	120		1	0.8	0.997		
Л	133		–	–	1.000		
Итого фоновые			Б	155	4	2.6	0.991
			Е	162	1	0.6	0.998
			Л	271	–	–	1.000
Умеренно нарушенные	Лиственничник чернично-зеленомошный	Низкая (пойменная) терраса	Б	127	4	3.1	0.989
			Е	61	–	–	1.000
			Л	26	–	–	1.000
	Лиственничник кустарничково-зеленомошный	Средняя часть коренного склона	Б	167	7	4.2	0.986
			Е	27	–	–	1.000
			Л	25	–	–	1.000
Сильно нарушенные	Лиственничник вейничково-крупнотравный	Низкая (пойменная) терраса	Б	71	3	4.2	0.986
			Е	8	1	12.5	0.958
			Л	180	5	2.8	0.991
	Лиственничник кустарничково-разнотравный	Терраса у верхней границы леса	Л	198	5	2.5	0.992
Итого нарушенные			Б	365	14	3.8	0.987
			Е	96	1	1.0	0.997
			Л	429	10	2.3	0.992
Всего			Б, Л, Е	1478	30	2.0	–

Эти результаты согласуются с другими наблюдениями. На начальных этапах загрязнения, когда наблюдалась редукция годового прироста, категория жизненного состояния древостоя, определяемая как средневзвешенная по объему стволов всех деревьев, не снижалась до тех пор, пока древостой не достигал в процессе ослабления стадии сильно нарушенного (Поляков, Полякова, 2005). Увеличение массы хвои (листьев) на начальных этапах промышленного загрязнения отмечалось рядом исследователей (Алексеев, Карпенко, 1985; Меншиков, 2004; Цветков В., Цветков И., 2003). Таким образом, сама по себе фитосоциальная организация древесного ценоза является одним из факторов адаптации древостоя к промышленному загрязнению.

Марковская модель (I) изреживания древостоев на основе оценки вероятности выживания деревьев. Количественные показатели отпада и оценки фактической вероятности выживания деревьев на ПП приведены в табл. 1.

В 2001 г. на шести ПП зарегистрировано 1727 деревьев. Из них живых (I–IV категории) – 1478. Остальные – сухостой (V и VI категории). Через 3 года перешло в сухостой или стало валежом 41 дерево. Из 30 деревьев, которые были живыми в 2001 г., за трехлетний период 28 усохли на корню, одна лиственница упала из-за бурелома и одна береза сломана снегом. Такие деревья обозначены в дальнейшем как отпад или выпавшие. Отнесенные к сухостою в 2001 г. 11 деревьев к 2004 г. упали.

Интенсивность отпада в загрязненных древостоях в 2.2 раза выше, чем в фоновых. Так, отпад березы в загрязненных насаждениях составил 3.8 % деревьев (усохло 3.6 %), в фоновых – 2.6 % (усохших не было); отпад лиственницы в загрязненных древостоях –

2.3 % (усохло 2.1 %), в фоновых отпада не было. Самый низкий отпад отмечен у ели: 1.0 и 0.6 % в загрязненных и фоновых древостоях соответственно.

Наибольшая доля деревьев за 3 года выпала на ключевом участке «Тукуланда» (лиственницы 2.8, ели 12.5 и березы 4.2 %). При этом отпад лиственницы в старовозрастном пойменном древостое и в средневозрастном у верхней границы леса оказался примерно равным (2.8 и 2.5 % соответственно). На ключевом участке «Ирбэ» выпала только береза (7.3 %), а на участке «Горбиачин» – береза (2.6 %) и ель (0.8 %).

Запас сухостоя на наиболее нарушенном загрязнением участке достигает 41 % (табл. 2).

ПП18, характеризующая этот участок, находится на возвышенности в долине р. Тукуланда в лиственничнике чернично-злаково-разнотравном. Эта ПП, к сожалению, не включена в модели, так как заложена в 2004 г. и повторно не измерялась. Усыхание леса началось с вводом в строй действующего комбината «Надежда» в 1979 г. Очевидно, что какая-то часть накопившегося за это время сухостоя перешла в валеж.

Следовательно, имея оценки сохранности сухостоя на корню, полученные за 3 года наблюдения, можно восстановить общее число погибших с 1979 г. деревьев и рассчитать вероятность их выживания по элементам леса в этих условиях.

Вероятность выживания деревьев за 1 год (P_1) определяли по формуле

$$P_1 = (N_0 - O_n / n) / N_0, \quad (1)$$

где N_0 – начальное число растущих деревьев, O_n – отпад за n лет, шт.

Вероятность сохранения сухостоя на корню за 1 год вычисляли по такой же формуле (1), где N_0 – начальное число сухостойных

Таблица 2. Таксационная характеристика сильно нарушенного загрязнением лиственничника чернично-злаково-разнотравного на ПП 18

Ярус	Состав, возраст элемента леса	Средние		Полнота	Запас, м ³ га ⁻¹		Доля сухостоя, %
		категория состояния	высота, м		растущего леса	сухостоя	
I	9Л ₃₀₀ 1Е ₃₀₇	3.9	19.5	0.2	65	53	45
II	10Б ₉₀ +Е ₉₀	3.0	11.5	0.1	23	8	26
В целом	7Л ₃₀₀ 2Б ₉₀ 1Е ₃₀₇ +Е ₉₀	3.8	17.9	0.3	88	61	41

деревьев, O_n – количество сухостоя, перешедшее в валеж за n лет, шт. (табл. 3).

Сравнение вероятности выживания деревьев за 1 год в лиственничнике на возвышенности с таковой в лиственничнике вейниково-крупнотравном пойменном показало, что лиственница на плакоре (возвышенности) снижает устойчивость к загрязнению (0.977 против 0.991), а устойчивость старой ели здесь, наоборот, повышается (с 0.958 до 0.985).

Доля ели в насаждениях по берегам рек обычно невелика, но на коренных склонах, террасах и вершинах лесистых увалов долины ее позиции укрепляются и участие в составе древостоев возрастает (иногда до 70 %). Здесь она доминирует и в подросте. Вероятность выживания березы на плакоре и в пойме примерно одна и та же ($0.985 \approx 0.986$).

Зависимость вероятности выживания от возраста дерева хорошо прослеживается на примере ели. В возрасте около 300 лет она характеризуется вероятностью выживания $P_1 = 0.985$, а у 90-летней ели этот показатель возрастает до $P_1 = 0.993$.

Таким образом, вероятность выживания дерева в древостое зависит от нагрузки загрязнения (степени нарушенности древостоя), древесной породы, условий местопрорастания и возраста дерева. Для оценки этой закономерности использована логит-регрессия, согласно которой предсказываемые значения для зависимой переменной (P_1) изменяются в интервале от 0 до 1 при любых значениях независимых признаков (x_1, x_2, x_3, x_4):

Таблица 3. Реконструкция состояния древостоя в 1979 г. и определение вероятности выживания деревьев в сильно нарушенном древостое на плакоре (возвышенности) в долине р. Тукуланды

Элемент леса, возраст	Число деревьев на ПП в 2004 г., шт.		Вероятность сохранения сухостоя на корню		Число погибших за 25 лет деревьев на ПП, шт.***	Число растущих деревьев на ПП в 1979 г., шт.	Вероятность выживания за 1 год
	растущих	сухостоя	за 1 год (P_1)*	за 25 лет (P_{25})**			
Е ₃₀₇	13	6	0.9885	0.749	8	21	0.985
Л ₃₀₀	88	94	0.9892	0.763	123	211	0.977
Б ₉₀	73	27	0.9816	0.629	43	116	0.985
Е ₉₀	7	1	0.9885	0.749	1	8	0.993

* За три года наблюдений на шести ПП из 127 сухостойных берез перешло в валеж 7, из 29 сухих елей – 1 и из 93 сухих лиственниц – 3, т. е. сохранность сухостоя на корню можно оценить по формуле (1).

** Вероятность P_{25} получена по правилу умножения вероятностей (Иванова и др., 1981): $P_{25} = (P_1)^{25}$.

*** Число погибших за 25 лет деревьев на ПП равно числу сухостоя в 2004 г., деленному на вероятность сохранения сухостоя на корню за 25 лет.

Таблица 4. Вероятность выживания лесообразующих пород за 10 лет (P_{10}) в связи со степенью нарушенности и местоположением древостоя в рельефе

Степень нарушенности древостоев	Местоположение	Лиственница	Ель	Береза
Фоновые	Низкая (пойменная) терраса	0.983	0.970	0.959
	Низ и центр коренного склона	0.980	0.965	0.953
	Верхняя граница леса	0.977	0.960	0.946
	Надпойменная терраса, возвышенность в долине	0.974	0.954	0.939
Умеренно нарушенные	Низкая (пойменная) терраса	0.965	0.940	0.919
	Низ и центр коренного склона	0.960	0.931	0.907
	Верхняя граница леса	0.954	0.921	0.894
	Надпойменная терраса, возвышенность в долине	0.947	0.909	0.879
Сильно нарушенные	Низкая (пойменная) терраса	0.930	0.881	0.842
	Низ и центр коренного склона	0.920	0.864	0.821
	Верхняя граница леса	0.908	0.846	0.797
	Надпойменная терраса, возвышенность в долине	0.895	0.824	0.770

Примечание. Вероятность P_{10} получена по правилу умножения вероятностей (Иванова и др., 1981): $P_{10} = (P_1)^{10}$.

$$P_1 = \exp(a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n) / (1 + \exp(a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n)), \quad (2)$$

где P_1 – вероятность выживания дерева за один год; a_i – определяемые коэффициенты модели; x_1 – древесная порода (1 – Б, 2 – Е, 3 – Л); x_2 – степень нарушенности древостоя (1 – фоновые, 2 – умеренно нарушенные, 3 – сильно нарушенные); x_3 – местоположение (1 – низкая (пойменная) терраса, 2 – нижняя (шлейф) и центральная часть коренного склона, 3 – верхняя часть склона у высотной границы леса, 4 – высокая надпойменная терраса или возвышенность в долине); x_4 – возраст древостоя элемента леса, лет.

Систематическая (δ) и случайная (σ) ошибки уравнения (2) невелики ($\delta = -0.04\%$, $\sigma = \pm 0.9\%$ с оценкой пяти и $\delta = 0.04\%$, $\sigma = \pm 0.8\%$ с оценкой четырех параметров). Модель (2) с оценкой пяти параметров достоверна на уровне значимости $p \leq 0.138$, а с оценкой четырех параметров – $p \leq 0.083$. Для повышения уровня значимости, по всей видимости, необходимо увеличение периода наблюдения и (или) количества ПП.

Результаты табулирования уравнения (2) с пятью параметрами для лесообразующих пород в наиболее часто встречаемом возрасте (лиственница – 220, ель – 180 и береза – 80 лет) приводятся в табл. 4.

Полученные результаты позволяют выделить влияние загрязнения на устойчивость древостоев от прочих факторов. По снижению вероятности выживания видно, что с ростом нагрузки загрязнения от фоновых к умеренно и сильно нарушенным древостоям устойчивость всех пород закономерно снижа-

ется. Древостои, произрастающие в лучших условиях – в поймах рек, на нижних (шлейфах) и средних частях коренных склонов, обладают большим «запасом прочности» по сравнению с древостоями верхних частей склонов, высоких надпойменных террас и сухих возвышенностей в долинах. Максимальные показатели вероятности выживания во всех случаях принадлежат более долговечной лиственнице, минимальные – березе. Ель занимает промежуточное положение.

Модель связи вероятности выживания деревьев с внутренними (ценотическими) и внешними (экологическими) факторами позволяет предсказать развитие ситуации в будущем и выявить долю отпада, обусловленную загрязнением. На рис. 2 показан ход изреживания древостоев в разных экологических условиях до 2030 г.

Полученный порядок изреживания не реализуется ни для какого конкретного древостоя, а является условным построением, отражающим отпад в зонах разной нарушенности насаждений, в силу чего является адекватной оценкой сложившейся экологической обстановки. Стартовое число деревьев – по 100 шт. каждой породы – взяли произвольно.

Густоту абстрактного древостоя прогнозировали по схеме марковской случайной цепи (уравнение 3) (Вентцель, Овчаров, 1991; Иванова и др., 1981). Определяли вероятность выживания деревьев за 10 лет (P_{10}), используя уравнение логит-регрессии (2) с четырьмя параметрами:

$$N_0 \times P_{10} \rightarrow N_1 \times P_{10} \rightarrow N_2 \times P_{10} \rightarrow N_3, \quad (3)$$

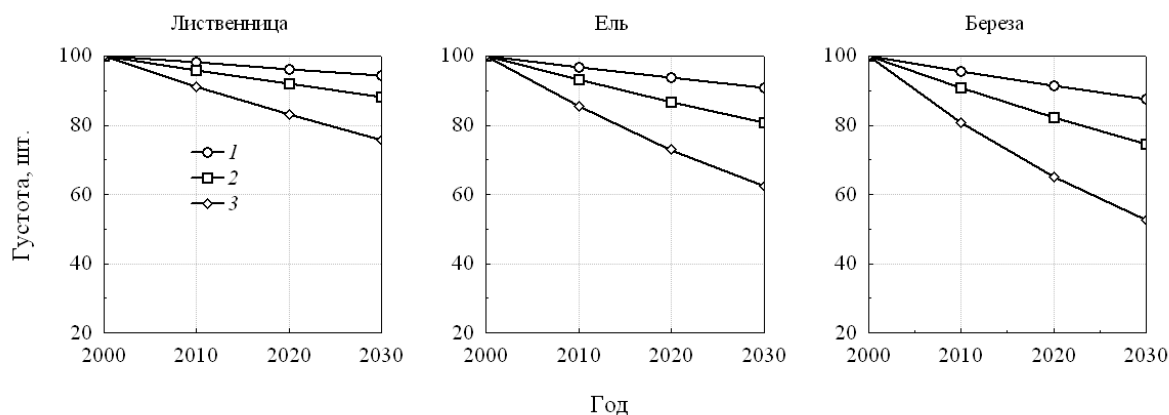


Рис. 2. Прогнозируемый моделью вероятности выживания деревьев по элементам леса порядок изреживания древостоев разной степени нарушенности: 1 – фоновых; 2 – умеренно нарушенных; 3 – сильно нарушенных.

где N_0, \dots, N_3 – густота в моменты времени: 2000, ..., 2030 гг.; P_{10} – переходная (условная) вероятность, определяемая с использованием уравнения (2) с четырьмя параметрами при соответствующем увеличении возраста древостоя элемента леса.

По результатам прогноза в сильно нарушенных древостоях за период 2000–2030 гг. из 100 условных деревьев лиственницы сохранится 75.637, т. е. отпад равен 24.363 условных дерева (см. рис. 2). В фоновых древостоях сохранится 94.430 деревьев, отпад равен 5.570. Из 24.363 деревьев 5.570 отпадут по естественным причинам. Количество деревьев, которые отпадут из-за сильного загрязнения, найденное как разница 24.363 и 5.570, равно 18.793. Примем 24.363 дерева за 100 %, тогда 18.793 составит 77 %. В умеренно нарушенных древостоях за период 2000–2030 гг. из 100 деревьев лиственницы отпадет 11.891. Из этих 11.891 деревьев 5.570 деревьев отпадут по естественным причинам. Количество деревьев, которые отпадут из-за умеренного загрязнения, найденное как разница 11.891 и 5.570, равно 6.321. Примем 11.891 деревьев за 100 %, тогда 6.321 составит 53 %. Таким образом, доля отпада лиственницы, обусловленная загрязнением в умеренно и сильно нарушенных древостоях оценивается соответственно в 53 и 77 %, ели – 52 и 75 %, березы – 51 и 74 %. Из трех пород у лиственницы доля отпада, вызванная загрязнением, самая высокая, у березы – самая низкая.

В теории случайных процессов (Вентцель, Овчаров, 1991) показано, что $M[x] = D[x]$, т. е. математическое ожидание случайной функции равно ее дисперсии (σ^2). Тогда, считая отпад случайной функцией времени, случайную ошибку густоты (σ) можно найти по формуле стандартного отклонения:

$$\delta = \sqrt{D[x]}, \quad (4)$$

где $D[x]$ – величина отпада, представляющая собой разность густоты базового 2001 г. и анализируемого года прогноза.

Если предполагаемый отпад лиственницы в условиях сильной нарушенности древостоев к 2010 г. оценивается в 9, а к 2030 г. – в 21 дерево, то σ в первом случае будет равна

± 3 и во втором – ± 5 деревьям. В результате надежность более отдаленного прогноза будет закономерно убывать.

Марковская модель (II) изреживания древостоев на основе оценки вероятности изменения категории жизненного состояния деревьев. Как в фоновых, так и в нарушенных загрязнением древостоях наблюдалось общее ухудшение жизненного состояния растущих деревьев всех пород. Всего из 1727 деревьев категорию состояния изменили 268 (15.5 %), в том числе 11 перешло из сухостоя в валеж. В фоновых древостоях из 690 изменили категорию 106 деревьев (15.4 %), в том числе 3 сухостойных. В умеренно нарушенных из 511 – 77 деревьев (15.1 %), в том числе 3 сухостойных. И в сильно нарушенных из 526 – 85 деревьев (16.2 %), в том числе 5 сухостойных.

Чаще всего за трехлетний период отмечалось снижение категории состояния на 1 балл (93 %). Однако имели место переходы в сторону ухудшения состояния на 2 и даже на 3 балла. Быстрее других пород ухудшает свое состояние береза. Ель характеризуется наименьшим количеством переходов. Лиственница занимает промежуточное положение; разница здесь лишь в том, что деревья IV категории в загрязненных древостоях чаще переходят в отпад.

Случаев перехода деревьев в более высокую категорию зарегистрировано только два. В фоновых древостоях из II категории в I перешла лиственница, в нарушенных загрязнением – береза. Случаев повышения категории жизненного состояния у деревьев III и IV категорий не отмечено. Наиболее интенсивный «отток» деревьев в фоновых древостоях наблюдался из I категории во II, в нарушенных загрязнением – из IV категории в отпад.

Частоту переходов деревьев по категориям состояния аналитически выровняли с помощью логит-регрессии (2). Выравнивание вели поэтапно в зависимости от степени нарушенности (1 – фоновые, 2 – умеренно нарушенные, 3 – сильно нарушенные), категории жизненного состояния и древесной породы (1 – Б, 2 – Е, 3 – Л). Вначале оценили шанс дерева остаться в прежней категории

Таблица 5. Матрицы вероятностей изменения категории жизненного состояния деревьев за 3 года для каждой лесобразующей породы в древостоях разной степени нарушенности

Категория	Фоновые					Умеренно нарушенные					Сильно нарушенные						
	I	II	III	IV	V	Валеж	I	II	III	IV	V	Валеж	I	II	III	IV	V
I*	0.78	0.18	0.03	0.01	0	0	0.80	0.17	0.02	0.01	0	0	0.82	0.15	0.02	0.01	0
	0.02	0.84	0.11	0.01	0.01	0	0.01	0.87	0.11	0.01	0	0	0	0.88	0.10	0.01	0.01
	0	0	0.90	0.05	0.03	0.02	0	0	0.80	0.16	0.04	0	0	0	0.75	0.19	0.04
	0	0	0	0.88	0.11	0.01	0	0	0	0.79	0.20	0.01	0	0	0	0.60	0.38
	0	0	0	0	0.96	0.04	0	0	0	0	0.94	0.06	0	0	0	0	0.92
I	0.80	0.17	0.02	0.01	0	0	0.84	0.13	0.02	0.01	0	0	0.84	0.13	0.02	0.01	0
	0.01	0.83	0.13	0.02	0.01	0	0	0.88	0.09	0.02	0.01	0	0	0.89	0.10	0.01	0
	0	0	0.90	0.06	0.03	0.01	0	0	0.86	0.09	0.03	0.02	0	0	0.82	0.13	0.04
	0	0	0	0.91	0.06	0.03	0	0	0	0.83	0.13	0.04	0	0	0	0.71	0.27
	0	0	0	0	0.97	0.03	0	0	0	0	0.95	0.05	0	0	0	0	0.93
I	0.82	0.14	0.03	0.01	0	0	0.86	0.10	0.03	0.01	0	0	0.88	0.09	0.02	0.01	0
	0.02	0.85	0.09	0.03	0.01	0	0	0.88	0.10	0.01	0.01	0	0	0.89	0.10	0.01	0
	0	0	0.92	0.05	0.02	0.01	0	0	0.86	0.10	0.03	0.01	0	0	0.82	0.14	0.03
	0	0	0	0.92	0.06	0.02	0	0	0	0.85	0.14	0.01	0	0	0	0.77	0.22
	0	0	0	0	0.98	0.02	0	0	0	0	0.96	0.04	0	0	0	0	0.95

* Например, из 100 берез I категории состояния в фоновых древостоях через 3 года в I категории останутся 78 деревьев, 18 перейдут во II, 3 – в III, 1 – в IV категорию.

состояния, затем – вероятность снижения категории на 1, 2 и 3 балла. Оценили также вероятность повышения категории на 1 балл и вероятность перехода сухостоя в валеж. При этом уровень значимости уравнений регрессии варьировал от $p < 0.000$ до $p < 0.975$. Во всяком случае, вероятности остаться в прежней категории и снизить ее на 1 балл были получены с высокой значимостью ($p < 0.004$ для 99 % всех деревьев). Оценки вероятностей перехода пересчитали пропорционально их величине так, чтобы сумма вероятностей каждой строки была равна единице (табл. 5).

Характер изреживания древостоев в разных экологических условиях прогнозировали по цепи Маркова до 2030 г. В однородной по времени марковской цепи вектор вероятностей состояний системы $P(t_i)$ в момент времени t_i равен произведению вектора вероятностей состояний $P(t_{i-1})$ в момент t_{i-1} на матрицу перехода $\Gamma(\tau)$ (Иванова и др., 1981):

$$P(t_i) = P(t_{i-1}) * \Gamma(\tau), \quad (5)$$

где τ – период времени в интервале от t_{i-1} до t_i (в нашем случае τ равно 3 годам).

Стартовое число деревьев – по 100 шт. каждой породы с равномерным распределением их по категориям жизненного состояния от I до IV умножали на матрицу вероятностей изменения категорий, получали новое распределение, умножали снова и т. д. Расчеты вели в предположении неизменности экологической обстановки и характера перехода деревьев по категориям жизненного со-

стояния. Результаты расчетов иллюстрирует рис. 3.

По интенсивности изреживания как в фоновых, так и в нарушенных загрязнением древостоях первое место занимает береза, второе – ель и третье – более долговечная лиственница.

Доля отпада лиственницы, обусловленная загрязнением в умеренно и сильно нарушенных древостоях, составила соответственно 30 и 40 %, ели – 24 и 36 %, березы – 23 и 35 %.

Более подробно порядок вычислений описан на примере изреживания пригородных сосняков Красноярска (Поляков, Полякова, 2005; Полякова, Поляков, 2013).

Таким образом, вторая марковская модель, как и первая, указывает на то, что первое место по газоустойчивости занимает береза, второе – ель, третье – лиственница. Первой под влиянием загрязнения из состава древостоев выпадает лиственница, следом за ней – перестойная ель и последней погибает береза, полог которой пополняется из подраста. После гибели березы под пологом сухостоя остается только поврежденный подрост ели, которому уже не суждено стать древостоем. Высокая жизнестойкость подраста ели подтверждается наличием обратной тесной связи вероятности выживания ели с возрастом ($r = -0,9$).

Положительного влияния листопадности на газоустойчивость пород не прослеживается. Очевидно, этот феномен не дает никакого

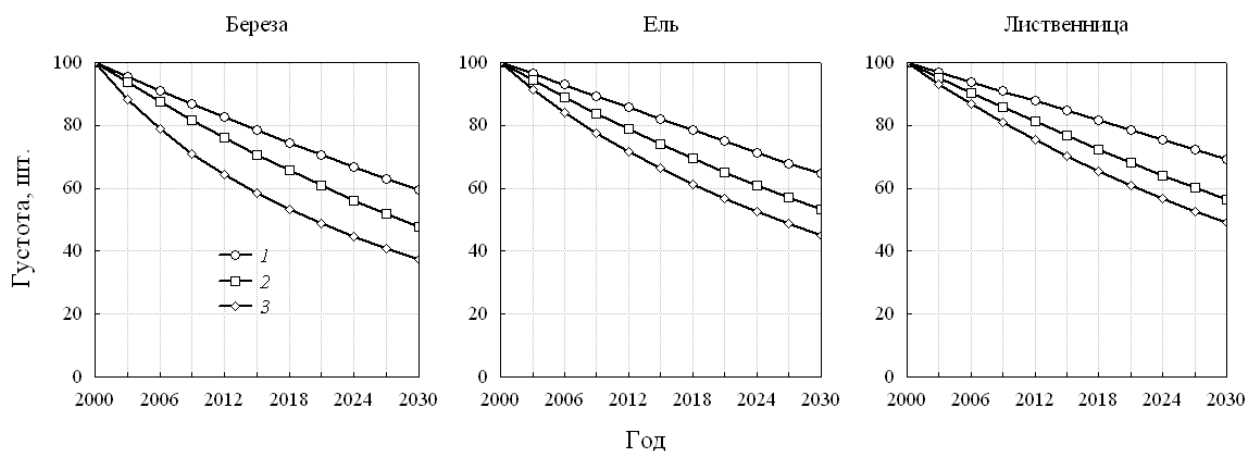


Рис. 3. Прогнозируемый моделью динамики жизненного состояния деревьев по элементам леса ход изреживания древостоев разной степени нарушенности: 1 – фоновых; 2 – умеренно нарушенных; 3 – сильно нарушенных.

преимущества, уступая место более значимым эколого-генетическим и климатическим факторам (Менщиков, 1991, 2004). Заметим, что при оценке относительной газоустойчивости пород С. Л. Менщиков выстраивает следующий ряд (в сторону ее ослабления): ель → береза → лиственница. Эти оценки несколько различаются с нашими, хотя следует отметить, что в ряду газоустойчивости береза и ель были поставлены ближе, чем ель и лиственница.

В соответствии с полученной моделью изреживания средняя категория состояния живых деревьев в нарушенных загрязнением древостоях оценивается выше, чем в фоновых. Это, как уже отмечалось, соответствует адаптационному синдрому растений (Пахомова, 1995) – активизации защитной реакции здоровых и быстрой гибели ослабленных деревьев III и IV категорий жизненного состояния в древостоях, стрессированных загрязнением. Этим также можно объяснить наблюдаемое в некоторых случаях увеличение радиального прироста деревьев в загрязненных древостоях по сравнению с фоновыми (Поляков и др., 2006; Цветков В., Цветков И., 2003).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные на стационарных объектах (постоянных ПП) исследования позволяют объяснить механизм адаптации древостоев к промышленному загрязнению. С помощью марковских моделей изреживания древостоев в разных экологических условиях можно отделить влияние загрязнения на устойчивость древостоев от прочих факторов, предсказать развитие ситуации в будущем, выявить долю отпада, обусловленную загрязнением, и оценить газоустойчивость лесобразующих пород. По причине загрязнения отпад лиственницы возрастает на 30–77 %, ели на – 24–75 и березы – на 23–74 %. Береза оказалась самой относительно газоустойчивой породой. По снижению вероятности выживания деревьев видно, что с ростом нагрузки загрязнения от фоновых к умеренно и сильно нарушенным древостоям устойчивость всех пород закономерно снижается.

Древостои, произрастающие в лучших условиях – в поймах рек, на нижних и средних частях коренных склонов, обладают большим «запасом прочности» по сравнению с древостоями верхних частей склонов, высоких надпойменных террас и сухих возвышенностей в долинах.

Таким образом, состояние древостоев на всей территории, подверженной влиянию выбросов Норильского промышленного района, ухудшается. Процесс деградации древостоев идет разными темпами: быстрее – в зоне сильного загрязнения и нарушенности, медленнее – при умеренном и слабом воздействии. С накоплением эффекта загрязнения и гибелью очередного участка леса граница зоны сухостоя продвигается вглубь лесного массива. Зону сильной нарушенности древостоев, в свою очередь, пополняют примыкающие участки умеренно поврежденного леса и т. д. Негативный процесс ослабления и гибели древостоев можно остановить лишь путем усовершенствования технологии производства, имеющего целью снижение объема выбросов SO₂ в атмосферу.

В связи с кончиной автора статью подготовила к печати Г. Г. Полякова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А. С.* Математическая модель процесса разрушения древостоев в зоне атмосферного загрязнения // Экспериментальное и математическое моделирование в изучении биогеоценоз лесов и болот: тез. докл. Всесоюз. конф. М., 1987. С. 74–77.
- Алексеев А. С., Карпенко А. Д.* Матричная модель процесса изменения состояния древостоя под воздействием загрязнения // Экология и защита леса. Взаимодействие компонентов лесных экосистем: сб. науч. тр. Л.: ЛТА, 1985. С. 3–6.
- Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991. 383 с.
- Иванова В. М., Калинина В. Н., Нешумова Л. А., Решетникова И. О.* Математическая статистика. М.: Высш. школа, 1981. 371 с.

- Менщиков С. Л.* Мониторинг загрязненных предтундровых лесов на юге Таймыра // Динамика лесных фитоценозов и экология насекомых-вредителей в условиях антропогенного воздействия. Свердловск, 1991. С. 15–25.
- Менщиков С. Л.* Закономерности трансформации предтундровых и таежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения и пути снижения наносимого ущерба: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург, 2004. 43 с.
- Пахомова В. М.* Основные положения современной теории стресса и неспецифический адаптационный синдром у растений // Цитология. 1995. Т. 37. № 1–2. С. 66–91.
- Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. ОСТ 56-69-83. Изд. официальное. Утв. и введен в действие приказом Гос. комитета СССР по лесн. хоз-ву от 23 мая 1983 г. № 72. М., 1983. 59 с.
- Поляков В. И., Иванов В. В., Абаимов А. П., Каплунов В. Я., Вараксин Г. С.* Оценка состояния, строения и продуктивности древостоев юго-западного макросклона плато Путорана // Лесная таксация и лесоустройство. 2003. № 1(32). С. 66–71.
- Поляков В. И., Иванов В. В., Солдатов В. А., Абаимов А. П., Зубарева О. Н., Ленкова Т. Л., Полякова Г. Г.* Фитомасса древостоев притундровых лесов юга Таймыра в условиях техногенного загрязнения // Природная и антропогенная динамика наземных экосистем: мат-лы Всерос. конф., 11–15 октября 2005 г., Иркутск. Иркутск, 2005а. С. 297–300.
- Поляков В. И., Иванов В. В., Абаимов А. П., Солдатов В. А.* Оценка влияния техногенного загрязнения на состояние древостоев в динамике // Лесопользование, экология и охрана лесов: фундаментальные и прикладные аспекты: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., 21–22 марта, 2005 г. Томск, 2005б. С. 117–119.
- Поляков В. И., Полякова Г. Г.* Особенности развития средневозрастных пригородных сосняков Красноярска // Лесная таксация и лесоустройство. 2005. № 1(34). С. 44–49.
- Поляков В. И., Полякова Г. Г., Стасова В. В.* Влияние природно-климатических и техногенных факторов на радиальный прирост сосны в пригородных сосняках Красноярска // Лесная таксация и лесоустройство. 2006. № 1(36). С. 76–81.
- Полякова Г. Г., Поляков М. В.* Проверка модели изреживания сосняков на постоянных пробных площадях // Лесная таксация и лесоустройство. 2013. № 1(49). С. 39–43.
- Савченко В. А.* Экологические проблемы Таймыра. М.: СИП РИА, 1998. 194 с.
- Санитарные правила в лесах Российской Федерации // Лесное законодательство Российской Федерации: сб. нормативных правовых актов. М.: ПАИМС, 1998. С. 310–329.
- Харук В. И., Винтенбергер К., Цибульский Г. М., Яхимович А. П.* Анализ техногенной деградации притундровых лесов по данным съемки из космоса // Исследования Земли из космоса. 1995. № 4. С. 91–97.
- Харук В. И., Винтенбергер К., Цибульский Г. М., Яхимович А. П., Мороз С. Н.* Техногенные повреждения притундровых лесов Норильской долины // Экология. 1996. № 6. С. 424–429.
- Цветков В. Ф., Цветков И. В.* Лес в условиях аэротехногенного загрязнения. Архангельск, 2003. 354 с.

Thinning of Tree Stands in the Arctic Zone of Krasnoyarsk Territory With Different Ecological Conditions

V. I. Polyakov

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

In 2001 six permanent sample plots (PSP) were established in forest stands differing in degrees of damage by pollution from the Norilsk industrial region. In 2004 the second forest inventory was carried out at these PSP for evaluation of pollutant impacts on stand condition changes. During both inventory procedures the vigor state of every tree was visually categorized according to 6-points scale of «Forest health regulations in Russian Federation». The changeover of tree into fall was also taken into account. Two types of Markov's models simulating thinning process in tree stands within different ecological conditions has been developed: 1) based on assessment for probability of tree survival during three years; 2) in terms of evaluation of matrix for probability on change of vigor state category in the same period. The reconstruction of tree mortality from 1979 after industrial complex «Nadezda» setting into operation was realized on the basis of probability estimation of dead standing trees conservation during three years observed. The forecast of situation was carried out up to 2030. Using logistic regression the probability of tree survival was established depending on four factors: degree of tree damage by pollutants, tree species, stand location in relief and tree age. The acquired results make it possible to single out an impact of pollutants to tree stands' resistance from other factors. There was revealed the percent of tree fall, resulted by pollution. The evaluation scale of SO₂ gas resistance of tree species was constructed: birch, spruce, larch. Larch showed the highest percent of fall because of pollution.

Keywords: *polluted stands, landscape, probability of tree survival, tree fall, prognosis, reconstruction, Markov's models, matrices, logistic regression, vigor state category scale, Таймыр.*