

УДК 630*181 + 630*43

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ПОСЛЕПОЖАРНОГО СОСТОЯНИЯ ЛИСТВЕННОЙ ГМЕЛИНЫ НА МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВАХ СРЕДНЕЙ СИБИРИ*

© 2004 г. А. П. Абаимов, С. Г. Прокушкин,
В. Г. Суховольский, Т. М. Овчинникова

Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН

660036 Красноярск, Академгородок

Поступила в редакцию 1.07.2003 г.

На основании многолетних наблюдений выполнена оценка жизненного состояния деревьев лиственницы (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) в разной степени поврежденных пожарами. Для выявления реакции дерева на тепловое повреждение использована модель, в соответствии с которой по динамическим рядам послепожарной репарации деревьев вычислялись параметры уравнения "доза (степень воздействия пожара на дерево) - эффект (изменение жизненного состояния дерева)". Для расчета дозы теплового воздействия использованы такие характеристики, как высота нагара, число поврежденных скелетных корней и их средневзвешенная степень повреждения. В качестве критерия устойчивости дерева к воздействию пожара принят его диаметр. Выявленные связи между дозой воздействия и показателями послепожарных репарационных процессов можно использовать для качественной оценки реакции лиственницы на интенсивность огневого воздействия.

Лиственница, жизненное состояние, пожар, доза повреждения, устойчивость, оценка, прогноз.

В разных природно-климатических условиях бореальной зоны планеты лесные пожары выступают в роли ведущего, а порой и единственного лесообразующего фактора, который в зависимости от характера огневого воздействия предопределяет степень трансформации среды, состава и структуры лесных сообществ, направление и темпы восстановительных сукцессий [7, 8, 11, 13, 22, 23, 29-34, 36].

Особенно велика экологическая роль пожаров в мерзлотной зоне [1-5, 16-18, 25-28, 37]. В связи с природными и пирологическими особенностями лесов и редколесий высоких широт Сибири, слабой хозяйственной освоенностью и низким уровнем организации их охраны в засушливые годы пожары распространяются на огромные площади [10, 17].

Многие исследователи отмечают, что в таежной зоне Сибири практически невозможно встретить сколь-либо значительные участки леса, которые не подвергались бы воздействию огня. По мнению А.И. Уткина, пирогенный фактор в лиственничных биогеоценозах Центральной Якутии "...определяет не только состояние лесов, но и весь ход их развития: от возобновления до распада" [21, с. 33].

Согласно экспертным оценкам, выполненным на основе анализа фондовых материалов и спутниковой информации, за последние десятилетия огневому воздействию в центральной части Эвенкии ежегодно подвергается около 1.1-1.5% площади лесного фонда [35]. По данным дендрохронологического анализа повторяемость лесных пожаров в северной подзоне тайги на территории Сибири в разных экологических условиях варьирует от 27 до 200 лет, составляя в среднем 80-90 лет [29, 31].

Следовательно, на протяжении жизни одного поколения древостоя лесные экосистемы мерзлотной зоны подвергаются дестабилизирующему воздействию пожаров не менее 3-5 раз. Своеобразные экологические условия предопределяют региональные особенности лесного покрова в зоне сплошного распространения мерзлоты и абсолютное преобладание низовых пожаров [15, 18]. При этом сильные беглые и устойчивые низовые пожары, вызывающие различные по интенсивности и продолжительности воздействия высоких температур на проводящие ткани стволов и поверхностных скелетных корней, даже при условии незначительного повреждения крон деревьев нередко приводят к гибели древостоев [24]. В связи с этим оценка и прогноз послепожарного изменения жизненного состояния поврежденных

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (99-04-96004, 01-04-48176); ККФН и РФФИ (99-04-96008); ФЦП "Интеграция" (А0023).

Таблица 1. Характеристика древостоев и их жизненного состояния после пожара

Пробная площадь	Тип растительной ассоциации	Средние*		Возраст, лет*	Густота, шт. га ⁻¹	Запас, м ³ га ⁻¹	Индекс жизненного состояния, %	
		d, см	H, м				по числу деревьев	по запасу
II-1	Лиственничник бруснично-голубичный зеленомошно-лишайниковый (после устойчивого низового пожара средней силы 1994 г.)	9.6	8.2	178-260	$\frac{1318}{1136}$	$\frac{50.0}{12.5}$	17.1	30.4
III-1	Лиственничник багульниково-брусничный зеленомошно-лишайниковый (после сильного беглого низового пожара 1993 г.)	8.0	7.1	196-290	$\frac{419}{3144}$	$\frac{27.0}{19.0}$	6.5	15.1
III-1 г	Аналогично пр.пл. III-1.	Узкая лента вдоль границы гари (III-1) после сильного беглого низового пожара 1993 г. Таксационную характеристику древостоя см. выше - пр.пл. III-1.						

* Средние диаметр, высота и возраст для сохранившихся после пожара деревьев.

Примечание. В числителе - растущих; в знаменателе - сухих.

огнем деревьев лиственницы представляется весьма актуальной.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты на базе Эвенкийского стационара института. Постоянные пробные площади расположены в окрестностях пос. Тура (64° 18' с.ш., 100° 11' в.д.). В качестве объектов длительных наблюдений были выбраны две гари, представляющие типичные для региона разновозрастные насаждения лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), сформировавшиеся под воздействием пожаров [5]. Лиственничник бруснично-голубичный зеленомошно-лишайниковый, расположенный на втором профиле (пр. пл. II-1), был пройден устойчивым низовым пожаром средней силы в 1994 г.

Насаждение на третьем профиле - лиственничник багульниково-брусничный зеленомошно-лишайниковый - (пр. пл. III-1) подверглось в июле 1993 г. воздействию сильного беглого низового пожара. Кроме того, по кромке пожарища в этом же типе леса в виде ленточной пробной площади (пр. пл. III-1г) было взято 107 деревьев, получивших огневые повреждения разной степени тяжести, но сохранивших жизнедеятельность. В результате огневого воздействия многие деревья лиственницы как на пр. пл. II-1, так и на пр. пл. III-1 погибли в год пожара [3, 24]. Часть из них, получив повреждения проводящих тканей стволов, корней и частично крон, сохранила жизнедеятельность после пожара (табл. 1).

На следующий год после пожаров (1994, 1995 гг.), помимо учетных лесоводственно-таксационных работ, все деревья на пробных площадях были пронумерованы. Для каждого из них сделаны замеры высот максимального нагара на стволах с

подветренной стороны и определена степень повреждения луба на высоте 1.3 м. Кроме того, у деревьев, сохранивших способность к жизнедеятельности, учитывалось общее число корневых лап (горизонтальных корней диаметром ≥ 10 мм) и число корневых лап, поврежденных огнем. Степень повреждения проводящих тканей устанавливалась по трем группам: 25, 50 и 100% от общей поверхности толстых проводящих корней по периметру (табл. 2).

Оценка жизненного состояния отдельных деревьев и древостоев в целом выполнена по методике В.А. Алексеева [6], модифицированной применительно к нашим задачам. Все учитываемые деревья по состоянию их крон и степени охвоения распределялись на пять групп: 1) здоровые (не имеют внешних признаков повреждения крон); 2) ослабленные; 3) сильно ослабленные; 4) отмирающие; 5) погибшие (сухие).

Здоровые деревья не имеют признаков ослабления кроны. Отмершие ветви находятся только в нижней части кроны и их не более 10%. Хвоя равномерно распределена по всей кроне. *У ослабленных* (поврежденных) деревьев около 30% отмерших ветвей, а хвоя сосредоточена в основном в верхней части кроны. *Сильно ослабленные* имеют до 60% усохших ветвей. *Отмирающим* деревьям свойственно почти полное разрушение кроны, у них более 70% сухих или отмирающих ветвей, с единичной хвоей. *Погибшие* (сухие) полностью прекратили свою жизнедеятельность. Обычно они заселены стволовыми вредителями. У деревьев, погибших до пожара, как правило, полностью утрачиваются крона и кора. По этим признакам они отличаются от погибших от огня деревьев. Следует отметить, что в условиях высоких широт сухие деревья могут находиться в древостое до 50 и более лет. Это обстоятельство важно учитывать при оценке нетто-продукции

Таблица 2. Степень повреждения луба стволов и корневых лап у лиственниц, сохранивших жизнедеятельность на следующий год после пожара

Показатель	Жизненное состояние деревьев			
	здоровые	ослабленные	сильно ослабленные	отмирающие
Число деревьев, экз., % от общего числа	1/0.8*	37/25.6	39/26.7	68/46.9
	14/20.9**	31/46.3	-	22/32.8
	68/63.6***	33/30.8	-	6/5.6
Средний диаметр, см	8.0*	10.9	9.6	7.5
	9.0**	8.1	-	7.0
	8.2***	7.0	-	7.8
Пределы колебаний диаметров, см	0*	6-17	5-16	3-12
	5-17**	3-12	-	2-10
	5-24***	3-20	-	6-13
Средняя высота нагара, м	1.62*	2.06 ± 0.06	1.92 ± 0.06	2.01 ± 0.06
	0.66 ± 0.18**	1.50 ± 0.14	-	1.67 ± 0.13
	0.57 ± 0.06***	0.83 ± 0.13	-	0.70 ± 0.17
Средняя площадь повреждения луба ствола на Н = 1.3 м, %	-*	-	-	-
	0**	52.42 ± 2.92	-	90.90 ± 3.51
	28.0 ± 3.42**	42.91 ± 6.20	-	41.67 ± 1.96
Среднее число корневых лап у одного дерева, экз.	6.0*	5.94 ± 0.30	6.21 ± 0.32	5.97 ± 0.26
	4.21 ± 0.21**	4.93 ± 0.31	-	8.09 ± 0.91
	10.28 ± 0.48***	8.39 ± 0.36	-	6.01 ± 0.58
Количество поврежденных лап у одного дерева, % от их среднего числа	50.0*	73.9	80.0	84.9
	9.8**	59.6	-	71.3
	54.5***	47.8	-	74.8
Из них повреждено, % от их среднего числа: на 25%	0*	0	0	0
	0**	13.8	-	2.3
	4.9***	3.3	-	2.8
на 50%	0*	10.8	14.0	6.2
	3.1**	12.4	-	26.4
	14.6***	15.7	-	27.6
на 100%	50.0*	63.1	66.0	78.7
	6.7**	33.4	-	42.6
	35.0***	28.8	-	44.4

* Пр. пл. II-1 (устойчивый низовой пожар средней силы 1994 г.).

** Пр. пл. III-1 (сильный беглый низовой пожар 1993 г.).

*** По границе гари (сильный беглый низовой пожар 1993 г.).

Примечание. Прочерк - данная категория деревьев или повреждение не рассматривались.

углерода в лесных экосистемах Севера, ее временной и пространственной динамики.

Исходя из совокупности внешних признаков и очевидных следов повреждения нижних частей крон, оснований стволов и корневых лап, каждому дереву присваивался интегральный индекс жизненного состояния в соответствии с приведен-

ной выше классификацией. Деревья, погибшие до и после пожара, учитывались отдельно. Суммарный индекс состояния древостоев (в %) рассчитывался по специальным формулам [6], учитывающим число деревьев и запасы древесины, включая сухостой (табл. 1). При этом жизненное состояние отдельных особей лиственницы мы

рассматривали как интегральный биологический показатель, отражающий не только характер взаимодействия между деревьями в процессе онтогенеза и влияния на их рост и развитие факторов внешней среды, но и степень огневого повреждения, повлекшего изменение их статуса после пожара. Визуальная оценка состояния поврежденных огнем деревьев лиственницы выполнялась ежегодно в течение пяти лет (1994-1998 гг.). Это позволило проследить за изменением жизненного состояния каждого дерева в отдельные годы и оценить степень устойчивости особей к пирогенному стрессу.

Для описания реакции дерева в ответ на воздействие высокой температуры при пожаре используют два подхода. Можно ввести дискретный набор состояний дерева и описывать временную динамику его перехода из одного состояния в другое. В общем случае такой процесс описывается полумарковскими моделями [20]. Реакция дерева в ответ на повреждение в этом случае характеризуется набором его состояний в течение ряда лет. При таком подходе можно изучать процесс послепожарной репарации в динамике, однако для верификации модели необходим значительный объем наблюдений.

При ином подходе вводится некоторый интегральный показатель состояния дерева и принимается, что реакция R дерева на воздействие будет зависеть от текущего состояния дерева $h(t)$ и от интенсивности воздействия $D(t)$. Эту зависимость в простейшем случае можно описать уравнением свертки [14, 19]:

$$R(t) = \int_0^t h(\tau)D(t-\tau)d\tau. \quad (1)$$

В формуле (1) параметр τ характеризует запаздывание ответной реакции дерева на внешнее воздействие (в данном случае пожар). Повреждение в ходе пожара можно рассматривать как импульсный фактор или так называемый кратковременный стресс, когда на дерево оказывается кратковременное воздействие. Тогда выражение (1) можно упростить и записать уравнение типа "доза-эффект", где эффект характеризует конечное состояние дерева через несколько лет после повреждения, а доза характеризует интенсивность воздействия. В качестве дозы W можно использовать некоторую функцию F от интенсивности T пожара и времени θ воздействия на дерево, например, произведение $W = T\theta$ или $W = \ln(T\theta)$ [9]. В этом случае из (1) следует:

$$R(t) = \int_0^t h(\tau)W\delta(t-\tau)d\tau = Wh(t). \quad (2)$$

Если интенсивность воздействия пожара и время, в течение которого деревья ему подвергались трудно оценить, то в качестве показателей интенсивности воздействия можно использовать косвенные признаки, такие как высота нагара на стволе, степень повреждения луба ствола и корневой, кроны и т.п. При таком подходе для верификации модели необходим существенно меньший объем данных, однако невозможно описать процесс репарации деревьев после пожара в динамике.

В случае, когда число типов кривых временной динамики изменения состояния деревьев достаточно мало, можно предложить для описания процессов репарации деревьев после пожара модель, сочетающую описанные выше основные подходы. В такой модели вводится уравнение "доза-эффект", где в качестве показателя эффекта рассматривается не конечное состояние дерева, а тип кривой послепожарной репарации состояния дерева.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка состояния древостоев через год после пожаров показала, что характер их повреждения в значительной степени зависит от силы температурного воздействия, косвенным индикатором которого служит высота нагара на стволах. Так, на пр. пл. II-1 она составляла в среднем 1.9 м (пределы 0.7-3.3 м). При этом в зависимости от жизненного состояния дерева высота нагара изменяется от 1.62 у здоровых до 1.92-2.06 м у ослабленных и отмирающих особей (табл. 2).

На следующий год после пожара здесь погибло 57% деревьев, имеющих диаметр меньше среднего. Суммарный же отпад деревьев лиственницы в этом древостое составил 38.3%. Сохранили жизнедеятельность преимущественно крупные деревья, диаметр которых составлял от 7-16 см. Однако и среди них отпад по разным ступеням толщины варьировал от 7 до 20%. Большинство крупных деревьев при оценке их жизненного состояния после пожара было отнесено к категориям ослабленных, сильно ослабленных, а часть - к отмирающим. Индекс жизненного состояния, рассчитанный по числу деревьев, составил 17.1%, по запасу - 30.4%, что свидетельствует о сильном повреждении древостоя на пр. пл. II-1.

На пр. пл. III-1 после сильного беглого низового пожара средняя высота нагара на стволах лиственницы составила 1.4 м (пределы 0.4-3.3 м). По данным учета 1994 г. на ней погибло 86% деревьев. При этом среди деревьев, имеющих диаметр ниже среднего, отпад составил 96% [2]. Из 67 учетных живых особей лиственницы 33% было отнесено к категории отмирающих, 46 - поврежденных и лишь 21% - здоровых по внешним признакам (табл. 2). Индекс жизненного состояния по

числу деревьев (6.5%) свидетельствует, что древесиной относится к категории погибающего, а по запасу (15.1%) - сильно ослабленного.

По границе гари у лиственниц с разной степенью повреждения высота нагара варьирует от 0.46 до 3.59 м. Из 107 учтенных живых деревьев 5.6% визуальным образом отнесено в первый год учета к отмирающим, 30.8 - к ослабленным, а 63.6% - к здоровым (табл. 2).

Ежегодный учет жизненного состояния лиственниц показал, что на пр. пл. II-1 уже через 3 года после пожара большая часть деревьев погибла, а через пять лет все ранее выделенные нами как ослабленные, сильно ослабленные и отмирающие деревья перешли в категорию погибших. На участке осталось всего одно живое дерево, которое ранее оценивалось как здоровое (рисунок, табл. 3).

На пр. пл. III-1 и по границе гари (пр. пл. III-1г) переход деревьев из одной категории жизненного состояния в другую более сложен (рисунок). В частности, в некоторых случаях здоровые деревья лиственницы перешли в категорию ослабленных и даже погибших. С другой стороны, некоторые слабо поврежденные особи перешли в категорию здоровых, но большая их часть - в погибшие или отмирающие. Большинство же отмирающих особей перешло за это время в категорию погибших (рисунок, табл. 3). В целом, анализируя данные табл. 2, 3 и рисунка, можно заключить, что послепожарное состояние деревьев в существенной степени зависит не только от высоты нагара и диаметра дерева, но и от степени повреждения проводящих тканей корневых лап и нижней части ствола.

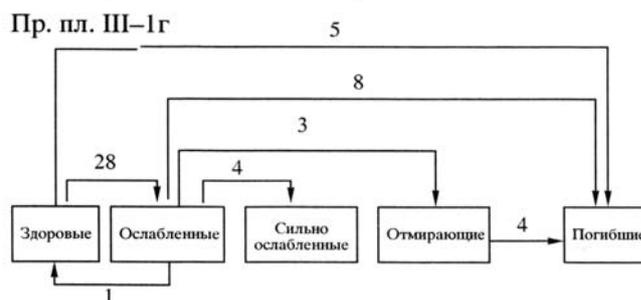
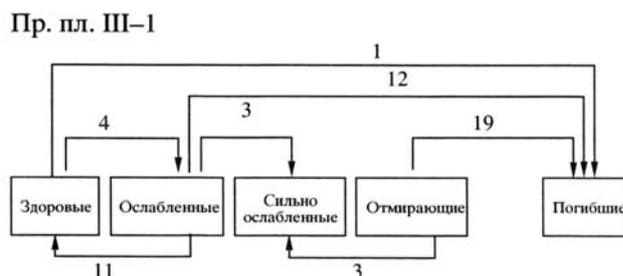


Схема изменения жизненного состояния деревьев лиственницы.

Для рассмотренных категорий огневого воздействия выделено пять основных типов временных кривых изменения состояния деревьев. У деревьев I типа за все время наблюдений категория состояния была не ниже второй. Деревья II типа в

Таблица 3. Жизненное состояние сохранившихся лиственниц через 5 лет после пожара в бруснично-голубичных зеленомошно-лишайниковых ассоциациях

Показатель	Категория деревьев				
	здоровые	ослабленные	сильно ослабленные	отмирающие	погибшие
Число деревьев, экз., % от общего количества	1/0.7*	0	0	0	145/99.3
	20/30.8**	7/10.8	6/9.2	0	32/49.2
	36/3.6***	45/42.1	4/3.7	5/4.7	17/15.9
Средний диаметр, см	8.0*	-	-	-	8.9
	8.8**	7.3	7.3	-	7.1
	9.1***	7.0	9.8	10.0	6.9
Пределы колебаний диаметров, см	0*	-	-	-	3-17
	3-17**	5-12	4-9	-	2-10
	3-24***	3-18	5-20	6-13	4-14

* Пр. пл. II-1 (устойчивый низовой пожар средней силы 1994 г.).

** Пр. пл. III-1 (сильный беглый низовой пожар 1993 г.).

*** По границе гари (сильный беглый низовой пожар 1993 г.).

Таблица 4. Значения коэффициентов дискриминантных функций для деревьев, поврежденных пожарами

Тип пожара	Классификационные функции	Переменная					
		диаметр дерева	высота нагара	общее число корней	число поврежденных корней	среднее повреждение корней, %	константа
Устойчивый низовой пожар средней силы	1	1.32	8.82	4.09	-4.00	34.17	-32.77
	2	1.11	8.52	3.81	-3.54	33.68	-30.14
	3	0.64	9.99	3.91	-3.60	34.99	-29.86
Сильный беглый низовой пожар	1	0.83	1.95	1.50	-1.73	15.91	-10.32
	2	0.65	2.53	1.65	-1.94	16.71	-12.08
	3	0.71	2.73	1.45	-1.75	16.94	-10.86
	4	0.58	3.48	1.57	-1.96	20.82	-13.35

ходе послепожарного восстановления имели категорию не ниже третьей. Деревья III типа погибали к концу периода наблюдений. Наконец, деревья IV и V типов погибали практически сразу после пожара.

В качестве показателей дозы воздействия D использовались следующие характеристики: высота нагара на стволе U , доля поврежденных корней Q и средневзвешенная поврежденность корней L . Показателем устойчивости дерева $H(0)$ к воздействию пожара служила величина его диаметра d . Выбор этого показателя связан с тем, что диаметр дерева аллометрическим уравнением связан с высотой дерева и пропорционален толщине древесной коры. Таким образом, предполагается, что чем больше геометрические размеры дерева, тем устойчивее оно к воздействию низового пожара. В качестве показателя реакции дерева использовалась величина Z , измеряемая в номинальной шкале и характеризующая тип кривой послепожарной репарации ($Z = I - V$). Деревья категории I практически не изменили своего состояния после пожара. Деревья категории II остались после пожара, но состояние их ухудшилось по сравнению с состоянием перед пожаром. Деревья категорий III-V погибли после пожара, причем деревья категории V погибли почти сразу же. В этом случае эффект воздействия Z можно характеризовать как некоторую функцию $F(U, Q, L, d)$ от показателей дозы воздействия и состояния дерева. Для верификации этой функции и описания реакции дерева на воздействие в настоящей работе использовался один из методов многомерной статистики - линейный дискриминантный анализ [12], при котором используется пространство параметров, характеризующих степень воздействия пожара на дерево (т.е. параметров U, Q, L) и начальное состояние дерева d . Все наблюдаемые объекты (деревья) определяются как принадлежащие к одному из априорных классов (в данном случае, к одному из типов кривой временной ре-

акции дерева). Методом наименьших квадратов устанавливается линейная функция от параметров U, Q, L, d , наилучшим образом разбивающая все деревья на группы в соответствии с априорными классами (т.е. типами временных кривых репарации). Линейная дискриминантная функция не описывает эффектов, связанных с нелинейностью воздействия пожара на деревья (отсутствием значительных повреждений при дозах воздействия ниже некоторой нижней критической дозы и существованием эффектов насыщения, когда дозы выше некоторой верхней критической величины гарантированно наносят дереву одинаковые и предельно возможные повреждения). Однако для случая, когда предельно низкие и предельно высокие интенсивности воздействия не наблюдались, использование линейной дискриминантной функции оправдано. Таким образом, модифицированное уравнение доза-эффект в этом случае имеет следующий вид:

$$Z = C + a_1U + a_2Q + a_3L + a_4d. \quad (3)$$

Уравнение (3) характеризует дискриминантную функцию, а ее коэффициенты a_1, \dots, a_4 определяются по данным наблюдений. Для успешной дискриминации обычно приходится использовать не одну, а несколько линейно независимых дискриминантных функций типа (3).

Вычисления параметров дискриминантных функций проводились с помощью компьютерного пакета Statistica 5.0. Для рассмотренной задачи достаточно использовать две функции типа (3). В табл. 4 приведены значения коэффициентов этих функций для случаев низового пожара средней силы и сильного беглого низового пожара.

Данные табл. 4 показывают, что для устойчивого низового пожара средней силы классифицирующие функции 1, 2 и 3 различаются только по коэффициенту при переменной "диаметр дерева". Это означает, что конечное состояние деревьев на пробной площади, пройденной пожаром,

определяется только одним показателем - диаметром дерева. Чем больше диаметр дерева, тем дольше дерево сопротивляется воздействию высоких температур в ходе пожара.

Для сильного беглого низового пожара классифицирующие функции отличаются по коэффициентам для трех переменных - диаметра дерева, высоты нагара и среднего повреждения корней деревьев. Таким образом, в данном случае конечное состояние деревьев определяется уже тремя характеристиками. Чем меньше диаметр дерева, больше высота нагара и больше процент среднего повреждения корней при пожаре, тем сильнее уровень повреждения дерева и тем хуже послепожарное его состояние.

Качество дискриминации деревьев разных категорий состояния характеризуется матрицей A , в которой диагональные элементы a_{ii} есть доля деревьев с i -м типом кривой репарационной динамики, правильно классифицированных с помощью дискриминантных функций типа (3), а элементы a_{ij} есть доля деревьев с i -м типом кривой репарационной динамики, классифицированных с помощью дискриминантных функций как деревья с j -м типом кривой репарационной динамики. В табл. 5 приведены значения элементов матриц качества дискриминации для изученных участков гари.

Как следует из приведенных данных, качество классификации достаточно высоко лишь для деревьев категории I (табл. 5). Более 90% этих наименее поврежденных при пожаре деревьев классифицируются правильно. Деревья категории II (со средним конечным уровнем ослабления) практически классифицируются как деревья категории I. Погибшие деревья категории III большей частью по показателям повреждения при пожаре и величине диаметра ствола дерева классифицируются как деревья категории I. Даже половина сильно поврежденных и затем погибших деревьев (категория IV) классифицируются как слабо поврежденные и репарировавшие свои повреждения деревья. Таким образом, для случая сильного беглого низового пожара линейный дискриминантный анализ достоверно классифицирует лишь деревья, слабо поврежденные огнем.

В табл. 6 приведена матрица качества классификации для случая устойчивого низового пожара средней силы. Из приведенных в ней данных видно, что с помощью использованных дискриминантных функций хорошо классифицируются деревья категории V; погибшие сразу же после огневого воздействия. Деревья категории III правильно классифицируются в половине случаев, большинство же деревьев категории IV классифицируются как деревья категории V.

Заключение. Использование таких морфологических показателей, как диаметр дерева, высо-

Таблица 5. Качество классификации деревьев с различным типом кривой послепожарной динамики с помощью линейных дискриминантных функций (для сильного беглого низового пожара)

Классификация, основанная на долгосрочных наблюдениях	Классификация с помощью дискриминантных функций			
	I	II	III	IV
I	0.92	0.00	0.03	0.04
II	0.86	0.00	0.00	0.14
III	0.80	0.00	0.03	0.18
IV	0.48	0.00	0.08	0.44

Таблица 6. Качество классификации деревьев с различным типом кривой послепожарной динамики с помощью линейных дискриминантных функций (для устойчивого низового пожара средней силы)

Классификация, основанная на долгосрочных наблюдениях	Классификация с помощью дискриминантных функций		
	III	IV	V
III	0.51	0.16	0.32
IV	0.18	0.31	0.51
V	0.07	0.06	0.87

та нагара на стволе, степень повреждения скелетных корней позволяет для условий мерзлотной зоны Средней Сибири дать лишь достаточно грубую оценку дозы повреждения и на этой основе предсказать будущее жизненное состояние дерева. Это означает, что диаметр дерева и число корней, а также высота нагара, доля поврежденных корней и степень их повреждения в совокупности не определяют однозначно дозу повреждения и репарационные способности лиственницы Гмелина.

Однако для качественной оценки реакции деревьев в насаждениях на определенный вид пожара вполне возможно использовать найденные дискриминантные функции. Рассматривая их как аналог кривых доза-эффект и зная степень повреждения дерева во время пожара, а также его диаметр, можно прогнозировать временные изменения жизненного состояния особей лиственницы после пирогенного стресса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абаимов А.П.* Современные тенденции и особенности лесообразовательного процесса в криолитозоне // Леса и лесообразовательный процесс на Дальнем Востоке. Матер. Междунар. конф., Владивосток, 1999. С. 11-13.
2. *Абаимов А.П., Прокушкин С.Г., Зырянова О.А.* Эколого-фитоценологическая оценка воздействия

- пожаров на леса криолитозоны Средней Сибири // Сиб. экологический журн. 1996. № 1. С. 51-60.
3. *Абаимов А.П., Прокушкин С.Г., Зырянова О.А.* Особенности послепожарных повреждений лиственничных лесов мерзлотной зоны Средней Сибири // Сиб. экологический журн. 1998. № 3-4. С. 315-323.
 4. *Абаимов А.П., Прокушкин С.Г., Зырянова О.А., Каверзина Л.Н.* Особенности формирования и функционирования лиственничных лесов на мерзлотных почвах // Лесоведение. 1997. № 5. С. 13-23.
 5. *Абаимов А.П., Прокушкин С.Г., Зырянова О.А., Каназава Ю., Такахаши К.* Экологическая и лесообразующая роль пожаров в криолитозоне Сибири // Лесоведение. 2001. № 5. С. 50-59.
 6. *Алексеев В.А.* Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51-57.
 7. *Валендик Э.Н.* Борьба с крупными лесными пожарами. Новосибирск: Наука, 1990. 193 с.
 8. *Валендик Э.Н.* Экологические аспекты лесных пожаров в Сибири // Сиб. экологический журн. 1996. № 1. С. 1-8.
 9. *Гирс Г.И., Суховольский В.Г.* Адаптационные изменения фотосинтеза сосны обыкновенной после теплового воздействия // Адаптация древесных растений к экстремальным условиям среды. Петрозаводск, 1984. С. 117-124.
 10. *Иванова Г.А.* Экстремальные пожароопасные сезоны в лесах Эвенкии // Сиб. экологический журн. 1996. № 1. С. 29-34.
 11. *Исаев А.С., Уткин А.И.* Низовые пожары в лиственничниках Восточной Сибири и значение стволовых вредителей в послепожарном состоянии древостоев // Защита лесов Сибири от насекомых-вредителей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 118-182.
 12. *Кендалл М., Стьюарт А.* Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 800 с.
 13. *Курбатский Н.П.* Пожары тайги, закономерности их возникновения и развития. Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: Красноярск, 1964. 38 с.
 14. *Льюнг Л.* Идентификация систем. М.: Наука, 1991. 432 с.
 15. *Матвеев П.М.* Последствия пожаров в лиственничных биогеоценозах на многолетней мерзлоте: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 06.03.03. Йошкар-Ола, 1992. 49 с.
 16. *Прокушкин С.Г., Сорокин Н.Д., Цветков П.А.* Экологические последствия пожаров в лиственничниках северной тайги Красноярского края // Лесоведение. 2000. № 4. С. 9-15.
 17. *Софронов М.А., Волокитина А.В.* Пожары растительности в зоне северных редколесий // Сиб. экологический журн. 1996. № 1. С. 43-49.
 18. *Софронов М.А., Волокитина А.В.* Об экологических особенностях зоны северных редколесий в Средней Сибири // Сиб. экологический журн. 1998. № 3-4. С. 245-250.
 19. *Суховольский В.Г., Пальникова Е.Н.* Типы реакций экосистем на внешние воздействия // Проблемы лесоведения и лесной экологии. Тез. докл. Минск; М., 1990. Ч. II. С. 647-650.
 20. *Тихонов В.И., Миронов М.А.* Марковские процессы. М.: Советское радио, 1977. 488 с.
 21. *Уткин А.И.* Леса Центральной Якутии. М.: Изд-во АН СССР, 1965. 206 с.
 22. *Фуряев В.В.* Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск, Наука, 1996. 253 с.
 23. *Щербаков И.П., Забелин О.Ф., Карпель Б.А., Михалева В.М., Чугунова Р.В., Яковлев А.П., Аверенский А.И., Короходкина В.Г.* Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. Новосибирск: Наука, 1979. 226 с.
 24. *Abaimov A.P., Prokushkin S.G.* Alteration of larch stands vital state in the permafrost zone of Central Siberia under fire influence // Proc. of the Fourth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1995. Japan, Sapporo, 1999. P. 57-64.
 25. *Abaimov A.P., Sofronov M.A.* The main trends of post-fire succession in near-tundra forests of Central Siberia // Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia / Eds. Goldammer J.G. et al. / Forestry sciences. Dordrecht, Boston, London, 1996. V. 48. P. 372-386.
 26. *Abaimov A.P., Prokushkin S.G., Matsuura Y., Osawa A., Takenaka A., Kajimoto T.* Wildfire and cutting effect on larch ecosystem permafrost dynamics in Central Siberia // Proc. of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Japan, Sapporo, 1999. P. 48-58.
 27. *Abaimov A.P., Zyryanova O.A., Kanazawa Y., Osawa A.* Estimation of *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. Regeneration on the Burned Areas in Central Siberia // Proc. of the Sixth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997. Japan, Tsukuba, 1998. P. 52-58.
 28. *Abaimov A.P., Zyryanova O.A., Prokushkin S.G., Koike T., Matsuura Y.* Forest ecosystems of the cryolithic zone of Siberia: regional features, mechanisms of stability and pyrogenic changes // Eurasian J. For. Res. 2000. № 1. P. 1-10.
 29. *Furyaev V.V., Vaganov E.A., Tchebakova N.M., Valendik E.N.* Effect of fire and climate on successions and structural changes of the Siberian boreal forest // Eurasian J. For. Res. 2001. № 2. P. 1-15.
 30. *Goldammer J.G., Furyaev V.V.* Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia. Ecological Impacts and Links to the Global System // Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia. Forestry sciences. Dordrecht, Boston, London, 1996. V. 48. P. 1-20.
 31. *Ivanova G.A.* The history of forest fire in Russia // Dendrochronologia. 1998-1999. V. 16-17. P. 147-161.
 32. *Korovin G.N.* Analysis of the distribution of forest fire in Russia // Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia / Eds. Goldammer J.G. et al. Forestry sciences. Dordrecht, Boston, London, 1996. V. 48. P. 112-128.
 33. *Roe A.I., Beaufait W.R.* Fire and forestry in the Northern Rocky Mountains - a task force report // J. Forestry. 1971. V. 69. № 8. P. 464-470.
 34. *Sannikov S.N., Goldammer J.G.* Fire Ecology of Pine Forests of Northern Eurasia // Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia / Eds. Goldammer J.G. et al. Forestry sciences. Dordrecht, Boston, London, 1996. V. 48. P. 151-167.

35. *Sofronov M.A., Volokitina A.V., Shvidenko A.Z., Kajimoto T.* On area burnt by wild fires in the northern part of Central Siberia // Proc. of the Sixth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997. Japan, Tsukuba, 1998. P. 139-146.
36. *Virek L.A.* Wildfire in the taiga of Alaska // Quart. Res. 1973. V. 3. № 3. P. 225-234.
37. *Zyryanova O.A., Bugaenko N.N., Bugaenko T.N., Matsuura Y.* Plant species composition dynamics on the initial stages of postfire progressive succession in Siberian cryolithic zone // Proc. of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Japan, Tsukuba, 1999. P. 59-66.

Evaluation and Forecast of *Larix gmelinii* Post-fire State on Permafrost-Affected Soils in Central Siberia

A. P. Abaimov, S. G. Prokushkin, V. G. Sukhovol'skii, and T. M. Ovchinnikova

The post-fire state of larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) trees damaged by fires of different strength is evaluated and predicted. A mathematical model describing a response of larch trees to fire is suggested. The model allows one to calculate parameters of the rate - effect equation according to dynamic rows of the tree post reparation. The relations revealed between the active rate and indices of post-fire reparation may be used for the qualitative estimation of responses of larch trees to a definite type of ground fire.