

УДК 630.114.68:630.43

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОЖАРОВ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА МИКРОБНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПОЧВ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

А.В. Богородская, Г.А. Иванова

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок, 50; e-mail: anbog@ksc.krasn.ru

Исследовано воздействие пожаров разной интенсивности на микробные комплексы почв сосновых лесов Средней Сибири. Показано, что в среднетаежных и южнотаежных сосняках пожары средней и, особенно, высокой интенсивности в первый год оказывают негативное влияние на структуру и функциональную активность микробных комплексов песчаных подзолов. Выявлено, что степень изменения послепожарного состояния микробноценозов почв связана не столько с интенсивностью воздействия пирогенного фактора, сколько с совокупным действием пирогеиза и гидротермических условий почвы на момент пожара. Благоприятное сочетание повышенной влажности и прогревания почвы стимулирует микробиологические процессы минерализации органического вещества, улучшая лесорастительные условия сосняков. Установлено, что скорость послепожарного восстановления структуры и функциональной активности микробных комплексов почв определяется как первоначальной силой воздействия пирогенного фактора, так и особенностями динамики гидротермических и трофических условий почв изучаемых сосняков.

The influence of fires of different intensities on microbial complexes of Scots pine soils of Central Siberian was examined. It was found, that fires of moderate and particularly high intensity had negative influence on structure and functioning of sandy podzol microbial complexes the first postfire year in central and southern taiga pine stands. The degree of changes in the postfire status of the soil microbocenoses was revealed to be related to the joint action of pyrogenesis and the hydrothermal conditions at the moment of the fire rather than to the fire intensity. The favorable combination of the elevated soil moisture and soil heating stimulates the mictobiological processes of organic matter mineralization, thus, improving the forest-growing conditions for the pine forests. The rate of postfire recovery of microbial complex structure and activity was established to be determined by fire intensity and severity, as well as by changes of soil hydrodynamic and trophic parameters.

ВВЕДЕНИЕ

В Сибири ежегодно регистрируются до 30 тыс. лесных пожаров, которые охватывают площадь около 10-12 млн. га [1]. На сосновые леса приходится до 60% от общего количества лесных пожаров [2], интенсивность которых широко варьирует в пространстве и во времени.

В связи с этим пожары рассматриваются в качестве естественно-исторического фактора развития современных лесных сообществ и направленности процессов почвообразования [3-6]. Известно, что пожары меняют гидротермические и трофические условия почв [4, 7] и, следовательно, влияют на микробиологические и биохимические процессы [8-11]. Изменения в почвах, происходящие после пожаров, в значительной степени зависят от вида и интенсивности пирогенного воздействия [6, 12]. Однако имеется мало исследований, касающихся влияния пожаров разной интенсивности на почвенные микробноценозы и вызываемые ими процессы [6, 8, 10, 11, 13-15] и отсутствуют исследования экологического состояния микробных комплексов почв после лесных пожаров с известными количественными параметрами, характеризующими интенсивность огня.

Цель работы заключалась в исследовании влияния пожаров разной интенсивности на структурно-динамические и функциональные особенности

микробных комплексов почв сосновых лесов Средней Сибири.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования почвенных микробноценозов после воздействия пожаров проводились в 2000-2006 гг. в среднетаежных и южнотаежных сосняках Средней Сибири.

Экспериментальные участки располагались в бассейне рек Дубчес и Сым в среднем течении реки Тогулан левого притока р. Енисей (60°38' с.ш. и 89°44' в.д.) и в Нижнем Приангарье в бассейне р. Ангары на правом берегу (58°42' с.ш. и 98°25' в.д.) и левобережье (58°35' с.ш. и 98°55' в.д.). Было заложено 12 участков (площадь каждого по 4 га), представленных средневозрастными сосняками кустарничково-лишайниково-зеленомошными (табл.1).

В напочвенном покрове сосняков доминировали лишайниковая и зеленомошная синузии. Почва под зеленомошными синузиями имела более высокое содержание органики и гумуса, а также элементов минерального питания, чем почва под лишайниковыми синузиями. В связи с этим изучение микробиоты было привязано к доминирующим синузиям участков. В составе же напочвенного покрова в южнотаежных сосняках на участках 3 и 5 лишайники были представлены незначительно, поэтому они отнесены к бруснично-зеленомошному типу.

Почвы исследуемых сосняков относятся к типу подзолов песчаных. Для данного типа почв харак-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 04-04-49384 и 07-04-00562)

Таблица 1 - Характеристика участков в сосняках Средней Сибири и параметры экспериментальных лесных пожаров

№ п/п и № участ- ка	Состав древос- стоя	Дср., см	Нср.,см	Полнота	Дата экспери- мента	Поведение пожаров*			
						Глубина прогорания подстилки с напоч- венным покровом, см	Скорость распро- стране- ния кромки огня, м/мин	Максимальная температура на поверхности мохово- лишайникового покрова, °С	Интенсив- ность кромки пожара, кВт/м
Среднетаежные сосняки									
1 (14)	10С	25.4	16.8	0.8	18.07.00	6.4	9.0	1010	9018
2 (13)	10С	35.2	17.9	0.8	25.07.00	4.7	2.0	910	1067
3 (19)	10С	31.1	19.4	0.8	28.07.01	3.5	2.9	800	1016
4 (2)	10С	30.5	20.6	0.6	19.06.01	4.4	4.9	920	2140
5 (3)	10С	30.6	20.0	0.6	26.07.01	3.3	2.5	890	1156
6 (4)	10С	29.0	20.9	0.7	30.07.02	3.8	1.4	600	587
7 (20)	10С	29.3	19.0	0.75	25.07.02	4.1	5.0	805	2200
8 (21)	10С	30.8	19.3	0.65	26.07.02	6.1	5.2	570	3987
Южнотаежные сосняки									
9 (1)	10С	24.0	18.5	0.9	18.06.02	4.6	6.5	940	3195
10 (2)	10С	26.1	22.0	0.7	19.06.02	5.6	6.8	955	4876
11 (3)	10С+Л	32.0	21.8	0.6	01.08.03	3.5	1.0	-	321
12 (5)	10С+Л Ед.Ос.	28.0	22.0	0.8	31.07.03	3.1	1.2	-	756

Примечание: * - [18].

терна ведущая роль подзолистого процесса, небольшая мощность и легкий (песчаный и супесчаный) гранулометрический состав. Некоторые различия в морфологии почв различных участков обуславливают их разную классификационную принадлежность.

Почвенный покров среднетаежных и южнотаежных участков (кроме участка 3) представлен иллювиально-железистым песчаным подзолом на аллювиальном мелкозернистом бескарбонатном песке и характеризуется мощным профилем, отчетливо дифференцированным на следующие горизонты [16]: О (0-5 см) – Е (5-13 см) – Bf1(13-45 см) – Bf2 (45-75 см) – Bf2C(75-95 см) – С (глубине 95 см).

Почва экспериментального участка 3 относится к неглубокоподзолистой типичной песчаной [16]. Почвенный профиль разделен на следующие горизонты: О 0-4(5) см – EL (5-20 см) – ELBT (20-35 см) – В (35-60 см и глубже).

С целью моделирования поведения лесных пожаров разной интенсивности и их влияния на экосистему в 2000-2003 гг. была проведена серия экспериментальных выжиганий, при которых горение распространялось фронтальной кромкой по ветру. Пожары во всех случаях были низовые. Количественные параметры экспериментальных пожаров представлены в таблице 1.

К низкоинтенсивным относили пожары с интенсивностью кромки огня ≤ 2000 , к среднеинтенсивным – 2001-4000, к высокоинтенсивным – более 4001 кВт/м [17, 18]. Также учитывали глубину прогорания подстилки и температуру во время пожаров. Так, на экспериментальном участке 13 в среднетаежном сосняке пожар классифицировали как среднеинтенсивный, поскольку при относительно невысокой интенсивности кромки огня (1067 кВт/м) глубина прогорания подстилки и температу-

ра на поверхности мохово-лишайникового покрова соответствовали значениям для среднеинтенсивного пожара.

Образцы почвы были взяты до выжигания и через сутки после выжигания, а также в течение пяти последующих лет в середине вегетационного периода. Изучение структуры и численности экологотрофических групп микроорганизмов (ЭКТГМ) почв до и после пожаров проводили общепринятыми методиками [19]. Идентификацию выделенных культур микроорганизмов осуществляли с использованием определителей [20, 21]. Корреляционный и регрессионный анализ связей ЭКТГМ с факторами среды выполняли с использованием компьютерной программы Microsoft Excel 2002 [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Иллювиально-железистые песчаные подзолы характеризуются низким содержанием гумуса (до 0,5%) и доступных форм элементов питания, высокой кислотностью (рН подстилки 3,6-4,4; почвы 4,8-5,2), широким соотношением С:N (от 21 до 34) и высоким содержанием в опаде трудноразлагаемых органических соединений, что отражается в их невысокой биогенности. Среди основных ЭКТГМ отмечено низкое содержание целлюлозо-разрушающих и утилизирующих органический азот бактерий. Микробные комплексы характеризуются преобладанием олиготрофных форм, слабым развитием актиномицетов, довольно высокой активностью минерализационных процессов, значительным количеством грибных пропагул только в самом верхнем органогенном слое и резким снижением с глубиной почвенного профиля.

Неглубокоподзолистая типичная песчаная почва участка 3 в южнотаежном сосняке характеризуется более высоким содержанием гумуса (0,5-

1,1%), меньшей кислотностью (рН подстилки 5,2-5,6; почвы 5,8-6,2) и более узким соотношением C:N (от 20 до 8). Повышение содержания легкодоступной органики создает здесь более благоприятные предпосылки для развития гетеротрофных микроорганизмов.

Пожары независимо от интенсивности приводили к выгоранию травяно-кустарничкового яруса, зеленомошно-лишайникового покрова и частичному пиролизу подстилки, которая максимально прогорала (в некоторых зонах вплоть до минерального горизонта) после высокоинтенсивного пожара в среднетаежном сосняке (участок 14), где в подстилке и верхнем минеральном слое почвы отмечено наибольшее снижение численности ко-

лонеобразующих единиц (КОЕ) ЭКТГМ, практически исчез вегетативный мицелий грибов и повысилась в 2-4 раза олиготрофность почв в отношении азота (табл. 2, 3).

Для почв после пожара средней интенсивности на участке 13 были характерны те же общие тенденции изменения структуры микробных комплексов, что и на участке 14, но численность основных ЭКТГМ была в 1,5-2 раза выше, чем при пожаре высокой интенсивности. Максимальное изменение структуры и численности микробных комплексов почв отмечено под лишайниковыми синузиями (табл. 3) из-за меньшей их увлажненности, в результате чего подстилка в них прогорает сильнее.

Таблица 2 - Численность микроорганизмов азотно-углеродного цикла и коэффициенты минерализации и олиготрофности почв под зеленомошными синузиями в среднетаежных сосняках сразу после пожаров

№ участка, год опыта, интенсивность пожара	Почвенный горизонт*	Аммонификаторы на МПА**	Прототрофы на КАА**	КАА/МПА	Грибы на СА**	Олиготрофы на ПА**	ПА/МПА
Контроль 2000	F+H	984±81	1406±95	1.40	1848±96	2137±104	2.20
	E	477±87	496±74	1.20	846±21	721±91	1.90
	BfI	25±3	30±4	1.20	34±4	41±10	2.80
14 2000 (высокая)	F+H	32±3	36±3	1.10	5±0,5	37±3	1.20
	E	39±4	48±5	1.10	44±4	170±12	4.30
	BfI	18±2	26±2	1.40	10±2	74±4	4.10
13 2000 (средняя)	F+H	67±4	72±8	1.10	26±4	211±21	3.10
	E	27±4	46±5	1.70	47±5	250±25	9.20
	BfI	14±3	18±1	1.20	-	22±4	1.50
Контроль 2001	F+H	5475±378	1833±156	0.35	2515±123	10152±2212	1.85
	E	910±254	1610±157	1.77	170±36	274±65	0.30
	BfI	399±16	799±58	2.01	768±56	3185±199	7.98
19 2001 (низкая)	F+H	1967±156	699±84	0.36	1322±58	3655±145	1.86
	E	1898±157	2124±575	1.12	1150±157	1015±310	0.53
	BfI	393±17	776±45	1.98	353±17	1603±166	4.08
Контроль 2002	F+H	19978±8722	22238±2239	1.11	17038±740	39472±9992	0.40
	E	1209±564	1184±43	0.97	84±45	962±804	0.80
	BfI	494±25	800±137	1.62	74±17	518±153	1.05
21 2002 (средняя)	F+H	42126±3776	21400±246	0.36	15700±5533	26000±733	0.62
	E	817±86	789±132	0.97	27±9	480±22	0.60
	BfI	1920±175	1296±434	0.68	6.9±4.2	6.9±3	0.004
4 2002 (низкая)	F+H	62120±1232	19856±348	0.32	28952±6560	32154±1420	0.52
	E	15456±560	489±54	0.03	245±52	520±78	0.03
	BfI	2450±178	1568±258	0.64	85±12	56±9	0.02

Примечание: *- глубина взятия образцов: E – 0-10 см; BfI – 10-20 см.; ** - КОЕ в тыс. / 1 г абсолютно сухой почвы; МПА - мясо-пептонный агар, КАА - крахмало-аммиачный агар, СА - сусло-агар, ПА - почвенный агар; (–) - нет данных.

Сразу после средне- и низкоинтенсивных пожаров (2001 г.) в почвах под лишайниковыми синузиями количество микроорганизмов изучаемых групп снизилось в 2-10 раз, тогда как в почвах под зеленомошными синузиями (участок 19) наблюдалось увеличение численности микроорганизмов азотно-углеродного цикла в 2-7 раз, что связано с особенностями поведения огня на этом участке: подстилка в лишайниковых синузиях прогорала сильнее, чем в зеленомошных. В результате слабого прогорания подстилки почва, вследствие ее низкой теплопроводности, не нагревается до критической температуры, при которой гибнет

микрофлора, а увеличение температуры почвы на несколько градусов способствует росту и размножению микроорганизмов и активизации микробиологических процессов. При этом количество прототрофов, использующих минеральные формы азота, в подстилке снижается в 2-3 раза после прохождения огня низкой и средней интенсивности, но в минеральном слое почвы (0-10 см) - увеличивается и доминирует над численностью аммонификаторов. Возрастание численности прототрофов, очевидно, связано с вымыванием зольных элементов из подстилки в более глубокие слои почвы после пожаров.

Таблица 3 - Численность микроорганизмов азотно-углеродного цикла и коэффициенты минерализации и олиготрофности почв под лишайниковыми синузиями в среднетаежных сосняках сразу после пожаров

№ участка, год опыта, интенсивность пожара	Почвенный горизонт	Аммонификаторы на МПА	Прототрофы на КАА	КАА/МПА	Грибы на СА	Олиготрофы на ПА	ПА/МПА
Контроль 2000	F+H	519±70	722±70	1.40	1167±30	1244±116	2.11
	E	212±41	407±57	1.92	657±89	596±37	2.10
	BfI	170±2	240±3	1.42	440±8	310±4	2.65
14 2000 (высокая)	F+H	27±4	38±4	1.41	5±0.4	94±10	3.48
	E	28±3	42±4	1.51	20±3	210±21	7.50
	BfI	9±2	10±0.9	1.10	-	20±2	2.22
13 2000 (средняя)	F+H	54±10	74±7	1.41	20±4	180±20	3.33
	E	21±4	41±4	1.90	16±4	206±22	9.81
	BfI	-	6±0.7	-	-	15±2	-
Контроль 2001	F+H	4025±286	1217±56	0.30	1170±142	4883±115	1.21
	E	958±44	1390±48	1.45	234±10	274±36	0.29
	BfI	101±10	525±12	5.20	30±5	951±21	1.50
19 2001 (низкая)	F+H	806±32	265±24	0.33	174±10	1825±112	2.26
	E	758±38	552±32	0.73	134±8	322±38	0.43
	BfI	162±11	304±21	1.88	61±6	1044±89	6.44
Контроль 2002	F+H	13256±1520	21727±1460	1.64	16246±1856	30398±4528	2.29
	E	175±48	294±44	1.68	56±21	224±42	1.28
	BfI	204±88	246±28	150	99±26	486±23	2.38
21 2002 (средняя)	F+H	39104±1500	37036±4762	0.94	17500±3600	26320±1750	0.67
	E	1445±161	1243±300	0.85	48±23	1144±169	0.78
	BfI	84±14	226±18	2.66	34±9	226±23	2.66
4 2002 (низкая)	F+H	55232±1420	45280±2560	0.82	32870±3560	21456±1230	0.39
	E	8562±785	7256±985	1.24	122±45	157±85	0.02
	BfI	745±123	455±145	0.61	46±8	545±45	0.73

Следует отметить, что кроме интенсивности огня на динамику численности ЭКТГМ влияют погодные условия года проведения экспериментальных пожаров. Так, в среднетаежных сосняках на участках 4 и 21, которые были выжжены в 2002 году, в подстилках зеленомошных и лишайниковых синузий отмечено возрастание количества микроорганизмов азотно-углеродного цикла по сравнению с контролем в 1,5-4,5 раза (табл. 2, 3). Такое различие с данными 2000-2001 гг. можно связать с более значительным увлажнением подстилок в 2002 году, что привело к известному явлению констелляции, когда оптимальное сочетание влажности и температуры вызвало существенное повышение численности микроорганизмов.

Уже в слое почвы 10-20 см нет заметных изменений численности микроорганизмов, что свидетельствует о влиянии огня средней и низкой интенсивности на почву только до глубины 10 см. Выявлено, что в момент горения на поверхности напочвенного покрова при высокоинтенсивном пожаре температура поднималась более 1000°C, под подстилкой она кратковременно достигала 190°C и не превышала 40°C при низкоинтенсивном пожаре. В почве на глубине 5 см при высокоинтенсивном пожаре температура могла на несколько секунд подниматься до 100°C, но в основном не превышала 50°C. В большинстве случаев она поднималась лишь на 2-3° С.

Ближние тенденции изменения структуры и численности изучаемых ЭКТГМ почв отмечены в

южнотаежных лишайниково-зеленомошных сосняках после пожаров высокой и средней интенсивности. Однако в подстилке и верхнем минеральном слое почвы 0-10 см численность микроорганизмов азотно-углеродного цикла снизилась меньше, что можно связать с более высокой влажностью подстилки и беглым характером пожаров.

После пожаров низкой интенсивности в бруснично-зеленомошных южнотаежных сосняках численность микроорганизмов всех групп в почве возрастает в 1,5-3 раза, тогда как в лишайниково-зеленомошных среднетаежных сосняках она в подстилке снижается в 1,5-4 раза, а в минеральном слое почвы 0-10 см – немного увеличивается. В результате слабого прогорания подстилки, почва, вследствие ее низкой теплопроводности, не нагревается до критической температуры, при которой гибнет микрофлора, а увеличение температуры почвы на несколько градусов способствует росту и размножению микроорганизмов и активизации микробиологических процессов.

В результате воздействия пожаров высокой и средней интенсивности происходит обеднение качественного состава микрофлоры. В бактериальных комплексах доминируют неспорообразующие бактерии рода *Pseudomonas* и исчезают бактерии родов *Achromobacter* и *Chromobacterium*. Из спорообразующих наиболее часто встречаются бактерии видов *Bacillus*. В подстилках после пожаров доминируют типичные для лесных экосистем сахаролитические грибы родов *Penicillium* и *Mucor* и исчезают

грибы родов *Cladosporium*, *Dematium* и *Trichoderma*. Во всех образцах присутствуют дрожжи рода *Lipomyces*.

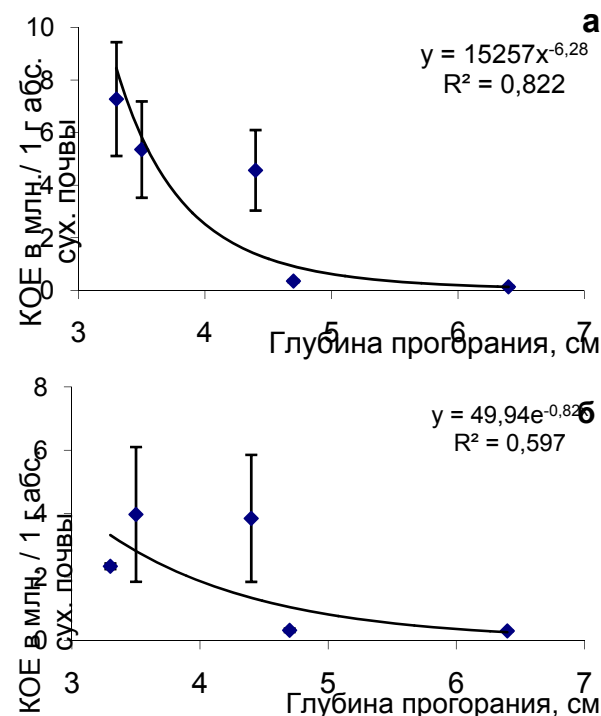


Рисунок 1 - Зависимость общей численности гетеротрофных микроорганизмов в подстилке (а) и минеральном слое почвы (0-10 см) (б) от глубины прогорания подстилки с напочвенным покровом в среднетаежных сосняках (2000-2001 гг.)

Изменение общей численности гетеротрофных микроорганизмов сразу после экспериментальных пожаров 2000-2001 гг. в значительной степени зависит от глубины прогорания подстилки (рис. 1). Также выявлена зависимость общей численности гетеротрофных микроорганизмов от температуры на поверхности мохово-лишайникового покрова ($R^2=0,69$ при $P=0,05$) и в минеральном слое почвы на глубине 0-10 см ($R^2=0,60$ при $P=0,05$) во время горения. Кроме того, она связана с влажностью почвы ($R^2=0,72$ при $P=0,05$).

Следовательно, чем выше температура на поверхности подстилки во время пожара, тем значительно снижается численность гетеротрофных микроорганизмов. Но действие высоких температур на почву нивелируется при повышенной влажности подстилки. Следует также учитывать длительность температурного воздействия: при беглых пожарах огонь распространяется со значительной скоростью и действие высоких температур на почвы измеряется несколькими секундами.

Послепожарное восстановление структуры и численности микробных комплексов почв определяется первоначальной силой воздействия пирогенного фактора (рис. 2). Кроме того, оно в значительной степени связано с динамикой гидротермических условий изучаемых сосняков. Так, динамика общей численности гетеротрофных микроорганизмов в 2002-2003 гг. в значительной степени определялась влажностью почвы ($R^2=0,84-0,87$ при

$P=0,05$).

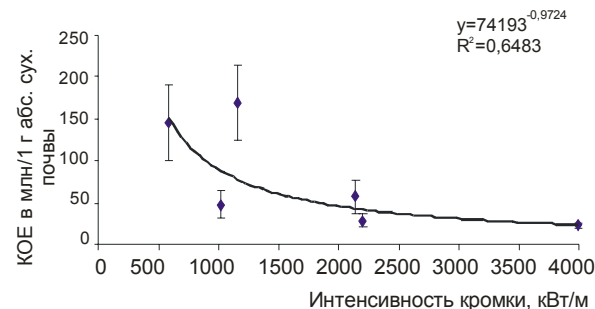


Рисунок 2 - Общая численность гетеротрофных микроорганизмов в подстилках среднетаежных сосняков через год после пожаров в зависимости от интенсивности кромки огня

В последующие годы после пожаров высокой и средней интенсивности отмечается процесс постепенной стабилизации микробных комплексов почв: активизируются микробиологические процессы минерализации опада и снижается олиготрофность, увеличивается видовое разнообразие микроорганизмов, восстанавливается активность функционирования гетеротрофного комплекса. В первые годы после пожаров средней интенсивности в почве сосняков восстановление численности и биомассы микроорганизмов происходит быстрее, чем после пожара высокой интенсивности. В подстилках отмечена более высокая биологическая активность по сравнению с контролем и через 4-5 лет количество микроорганизмов азотно-углеродного цикла уже не зависит от интенсивности пожара и сравнимо с контролем. Через год после низкоинтенсивных пожаров количество микроорганизмов всех групп возрастает, биологическая активность и минерализационная способность почв увеличиваются, что создает благоприятные предпосылки для послепожарного лесовосстановления.

На развитие микробных комплексов почв факторы среды оказывают совместное влияние. Выделить влияние отдельного фактора в данный момент времени сложно, так как сама почва как среда обитания микроорганизмов обладает гетерогенностью, так и микробные комплексы обладают высокой изменчивостью количественного состава. Показано, что на структуру и численность ЭКТГМ почв после пожаров оказывают влияние как интенсивность воздействия пирогенного фактора, так и гидротермические условия на момент пожара, причем совокупное влияние факторов (в данном случае влажности и прогревания почвы) – явление констелляции – может приводить к неожиданным последствиям: всплеску численности микроорганизмов. Дальнейшая послепожарная динамика развития ЭКТГМ также определяется как гидротермическими условиями года, так и первоначальной интенсивностью огня, но только в первые годы после пожаров. Изучение послепожарной динамики численности гетеротрофных микроорганизмов на участках 13 и 14 показало, что уже через 4-5 лет количество микроорганизмов азотно-углеродного цикла не зависит от интенсивности по-

жара.

Единый эдафический и климатический фон среднетаежных сосняков дает возможность оценить влияние отдельных факторов среды и лесорастительных условий почв на динамику ЭКТГМ после пожаров.

Выявления количественных связей микроорганизмов почвы и подстилки трех участков в среднетаежных сосняках по двум доминирующим синузиям с факторами среды и лесорастительными свойствами проводились при помощи парных коэффициентов корреляции. В качестве основных факторов были выбраны: влажность почвы (%), температура почвы (°C), запасы подстилки (г/м²), содержание гумуса (%), C:N, гидролитическая кислотность (м-экв./100 г), pH водный, степень насыщенности основаниями (%), содержание подвижного NH₄⁺ (мг/100 г), валовый азот (%), подвижный калий (K₂O, мг/кг), подвижный фосфор (P₂O₅, мг/кг).

Коэффициенты корреляции подсчитывались парно для вышеперечисленных факторов и общей численности гетеротрофных микроорганизмов подстилки и почвы, аммонификаторов, прототрофов, олиготрофов и микроскопических грибов.

Из всей совокупности факторов нами были выбраны те, коэффициенты корреляции которых являлись достоверными. Для них были получены уравнения регрессии, позволявшие выявить степень влияния каждого фактора [22].

На общую численность гетеротрофных микроорганизмов в подстилке и почве сосняков через два и три года после пожаров существенное влияние оказывали влажность, содержание общего и аммонийного азота. Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Y = -20,55 + 4,27x_1 + 75,98x_2 - 2,14x_3 \quad (1)$$

при R² = 0,98,

где Y – общая численность гетеротрофных микроорганизмов (в млн. КОЕ / 1 г абсолютно сухой почвы); x₁ – влажность (%); x₂ – валовый азот (%); x₃ – подвижный NH₄⁺ (мг/100 г).

Таким образом, повышение влажности и валового азота в среде благоприятствует увеличению общей численности микроорганизмов. Отрицательная зависимость содержания иона аммония и общего количества микроорганизмов, вероятно, сохраняется в определенных пределах. Низкое количество аммония в среде, также как и очень высокое, будет отрицательно влиять на развитие почвенной микрофлоры.

Численность аммонифицирующих микроорганизмов зависит от влажности, содержания общего и аммонийного азота и гумуса:

$$Y = 3,52 + 0,45x_1 + 1,34x_2 + 61,76x_3 - 2,12x_4 \quad (2)$$

при R² = 0,88,

где Y – количество аммонификаторов (в млн. КОЕ / 1 г абсолютно сухой почвы); x₁ – влажность (%); x₂ – гумус (%); x₃ – валовый азот (%); x₄ – подвижный NH₄⁺ (мг/100 г).

Повышение влажности, валового азота и гумуса в среде благоприятствует увеличению численности аммонификаторов. Значительное увеличение ионов аммония в среде снижало активность процессов аммонификации, но, вероятно, отрицательная зависимость здесь сохраняется также в определенных пределах.

Численность микроорганизмов, использующих минеральные формы азота (прототрофы), в значительной степени зависит от влажности, гумуса и содержания аммонийного азота:

$$Y = -16,57 + 1,72x_1 - 0,99x_2 + 0,59x_3 \quad (3)$$

при R² = 0,63,

где Y – количество прототрофов (в млн. КОЕ / 1 г абсолютно сухой почвы); x₁ – влажность (%); x₂ – гумус (%); x₃ – подвижный NH₄⁺ (мг/100 г).

Повышение влажности и подвижного аммония положительно влияло на численность прототрофов, в то время как увеличение гумуса почвы отрицательно сказывалось на развитии микроорганизмов, предпочитающих минеральные соединения.

Численность пропагул микроскопических грибов в подстилке и почве через два и три года после пожаров определяется влажностью, содержанием гумуса, валового азота и гидролитической кислотностью среды:

$$Y = -34,14 + 29,09x_1 - 0,44x_2 + 32,90x_3 + 0,69x_4 \quad (4)$$

при R² = 0,96,

где Y – количество микромицетов (в млн. КОЕ / 1 г абсолютно сухой почвы); x₁ – влажность (%); x₂ – гумус (%); x₃ – валовый азот (%); x₄ – гидролитическая кислотность (м-экв./100 г).

Повышение влажности, валового азота и гидролитической кислотности благоприятствуют росту и споруляции микромицетов. Отрицательная зависимость микромицетов от содержания гумуса объясняется предпочтением использования ими в качестве источников углерода легкоусвояемых углеводов, а не труднорастворимых гумусовых веществ.

Численность олиготрофных микроорганизмов существенно зависит от влажности, содержания гумуса, валового и аммонийного азота:

$$Y = -3,99 + 1,13x_1 + 0,79x_2 + 39,15x_3 - 1,55x_4 \quad (5)$$

при R² = 0,97,

где Y – количество олиготрофов (в млн. КОЕ / 1 г абсолютно сухой почвы); x₁ – влажность (%); x₂ – гумус (%); x₃ – валовый азот (%); x₄ – подвижный NH₄ (мг/100 г).

Повышение влажности, валового азота и гумуса способствуют увеличению количества олиготрофов, которые могут использовать питательные вещества из «рассеянного состояния». Увеличение в среде аммонийного азота будет подавлять развитие олиготрофов.

Таким образом, из всей совокупности факторов, влияющих на развитие ЭКТГМ в песчаных подзолах, на второй и третий годы после пожаров наибо-

лее важными являются влажность субстрата, наличие валового азота и подвижного аммония, а также содержание гумуса. Эти же факторы играют существенную роль в лесовозобновлении после пожаров, обуславливая оптимальные лесорастительные свойства почв. В свою очередь последние связаны с интенсивностью и направленностью процессов микробиологической деструкции растительных остатков, аммонификации, нитрификации, азотфиксации и других циклов, осуществляемых микроорганизмами лесной подстилки и почвы. Иными словами, послепожарная лесорастительная способность почв в значительной степени зависит от функциональной активности микробных комплексов.

ВЫВОДЫ

1. В среднетаежных и южнотаежных сосняках Средней Сибири пожары средней и, особенно, высокой интенсивности в первый год оказывают негативное влияние на структуру и функциональную активность микробных комплексов песчаных подзолов. Снижается численность и биомасса микроорганизмов азотно-углеродного цикла, обедняется качественный состав, повышается олиготрофность почв в отношении азота.

2. Интенсивность действия пирогенного фактора на микробоценозы почв определяется погодными условиями года проведения выжиганий. Действие огня любой интенсивности на микробоценозы почв нивелируется высокой влажностью подстилок. Оптимальное сочетание тепла и влаги в совокупности с улучшением трофических условий почв приводят к повышению микробиологической активности после пожаров средней и низкой интенсивности.

3. Пожары низкой интенсивности в первый год приводят к снижению численности всех ЭКТГМ в подстилке в 2-6 раз, а в нижележащих горизонтах почвы стимулируют процессы мобилизации азота и увеличивают ферментативную активность. Уже через год после низкоинтенсивных пожаров отмечается положительная динамика биогенности и микробиологической активности почв, что благоприятно влияет на их лесорастительные свойства.

4. В последующие годы после пожаров высокой и средней интенсивности отмечается процесс постепенной стабилизации структуры микробных комплексов почв, активизируются микробиологические процессы минерализации опада, снижается олиготрофность, увеличивается видовое разнообразие микроорганизмов, восстанавливается активность функционирования гетеротрофного комплекса.

5. Скорость послепожарного восстановления структуры и функциональной активности микробных комплексов почв определяется как первоначальной силой воздействия пирогенного фактора, так и особенностями динамики гидротермических и трофических условий почв изучаемых сосняков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Conard, S.G. Wildfire in Russian boreal forests - Potential impacts of fire regime characteristics on emission and global carbon balance estimates / S.G. Conard, G.A. Ivanova // *Environ. Pollut.* - 1997. - 98. - P. 305-313.
2. Korovin G.N. Analysis of the Distribution of Forest Fires in Russia / G.N. Korovin // *Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia.* - Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers. - 1996. - P. 112-128.
3. Попова, Э.П. Пирогенная трансформация свойств почв Среднего Приангарья / Э.П. Попова // *Сибирский экологический журнал.* - 1997. - №4. - С.413-418.
4. Краснощеков, Ю.Н. Почвозащитная роль горных лесов бассейна озера Байкал / Ю.Н. Краснощеков. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. - 224 с.
5. Doerr, S.H. Fire effects on soil system functioning: new insights and future challenges / S.H. Doerr, A. Cerda // *International Journal of Wildland Fire.* - 2005. - V.14. - P. 339-342.
6. Certini, G. Effects of fire on properties of forest soils: a review / G. Certini // *Oecologia.* - 2005. - V.143. - P. 1-10.
7. Thomas, A.D. Nutrient losses in eroded sediment after fire in eucalyptus and pine forests in the wet Mediterranean environment of northern Portugal / A.D. Thomas, R.P.D. Walsh, R.A. Shakesby // *Catena.* - 1999. - V.36. - P. 283-302.
8. Сорокин, Н.Д. Влияние лесных пожаров на биологическую активность почв / Н.Д. Сорокин // *Лесоведение.* - 1983. - №4. - С. 24-28.
9. Цветков, П.А. Эдафические условия и лесовосстановление после пожаров в лиственничниках Эвенкии / П.А. Цветков, Н.Д. Сорокин, С.Г. Прокушкин // *Лесоведение.* - 2001. - №2. - С. 16-21.
10. Сорокин, Н.Д. Влияние низовых пожаров на биологическую активность криогенных почв Сибири / Н.Д. Сорокин, С.Ю. Евграфова, И.Д. Гродницкая // *Почвоведение.* - 2000. - №3. - С. 315-319.
11. D'Ascoli, R. Functional diversity of the microbial community in Mediterranean maquis soils affected by fires / R. D'Ascoli et al // *International Journal of Wildland Fire.* - 2005. - V.14. - P. 355-363.
12. Nearly, D.G. Fire effects on bellowground sustainability: review and synthesis / D.G. Nearly et al // *Forest Ecology and Management.* - 1999. - V.122. - P. 51-71.
13. Pietikainen, J. Clear-cutting and prescribed burning in coniferous forest: comparison of effects on soil fungal and total microbial biomass, respiration activity and nitrification / J. Pietikainen, H. Fritze // *Soil Biol. Biochem.* - 1995. - V. 27. - P. 101-109.
14. Choromanska, U. Microbial activity and nitrogen mineralization in forest mineral soils following heating: evaluation of post-fire effects / U. Choromanska, T.H. DeLuca // *Soil Biol. Biochem.* - 2002. - V.34. - P. 263-271.
15. Wuthrich, C. Soil respiration and soil microbial biomass after fire in a sweet chestnut forest in southern Switzerland / C. Wuthrich et al // *Catena.* - 2002. - V.48. - P. 201-215.
16. Классификация и диагностика почв России / авторы и составители: Л.С. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. - Смоленск: Ойкумена, 2004. - 342 с.
17. Иванова, Г.А. Зонально-экологические особенности лесных пожаров в сосняках Средней Сибири: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Г.А. Иванова. - Красноярск: ИЛ, 2005. - 40 с.
18. McRae, D.J. Variability of fire behavior, fire effects and emissions in Scotch Pine Forests of Central Siberia / D.J. McRae et al // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.* - 2006. - V.11. - P. 45-74.

19. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. - М: Изд-во МГУ, 1991.- 304 с.
20. Добровольская, Т.Г. Методы выделения и идентификации почвенных бактерий / Т.Г. Добровольская, И.Н. Скворцова, Л.В. Лысак. - М.: Изд-во МГУ, 1989. - 71 с.
21. Определитель бактерий Берги. В 2-х томах. - М.: Мир, 1997. - Т.1. - С.1-436.
22. Определитель бактерий Берги. В 2-х томах. - М.: Мир, 1997. - Т.2. - С. 437-800.
23. Гельман, В.Я. Решение математических задач средствами Excel / В.Я. Гельман. - Санкт-Петербург: Питер, 2003. - 237 с.

Поступила в редакцию 16 апреля 2007 г.
Принята к печати 26 ноября 2007 г.