

УДК 630*11:43:114

ПОСТПИРОГЕННАЯ ДИГРЕССИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ГОРНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ

Ю. Н. Краснощеков, М. Д. Евдокименко, А. А. Онучин

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

E-mail: kyn47@mail.ru; institute_forest@krc.krasn.ru; onuchin@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 23.05.2018 г.

Рассмотрены результаты многолетних исследований роли пирогенного фактора в динамике лесных экосистем в горном Прибайкалье. Проанализированы последствия низовых пожаров в полном диапазоне их интенсивности – от слабых до экстремально сильных. Получены дифференцированные по видам и степени огневого воздействия характеристики повреждений в сосново-лиственничных древостоях: обгорание и подсушины на стволах, отмирание крон с ослаблением жизнеспособности деревьев, аномальное изреживание. Нагар на поверхности ствола как показатель степени огневого воздействия служит внешним диагностическим признаком послепожарного состояния дерева. Чем выше по стволу нагар, тем большая часть дерева подвергалась губительному термическому воздействию. Но вследствие выраженной в лесных насаждениях изменчивости по росту деревьев различаются по своей реакции на такие воздействия. Молодняки сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. и лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb. в значительной степени повреждены и, как правило, отмирают после воздействия пожара средней интенсивности, а в 10–15-летнем возрасте гибнут даже от слабого низового пожара. Наиболее уязвимы древесные породы с тонкой корой, такие как сосна кедровая сибирская *Pinus sibirica* Du Tour, ель сибирская *Picea obovata* Ledeb., пихта сибирская *Abies sibirica* Ledeb., береза плосколистная *Betula platyphylla* Sukacz. Отмечено, что 100–120-летние кедровники в значительной степени повреждаются низовым огнем слабой интенсивности, а после интенсивного низового пожара повреждаются полностью. Приведены количественные показатели жидкого и твердого поверхностного стока на гаях. Предложены математические модели формирования жидкого поверхностного стока и связанной с ним эрозии почв на пожарищах в зависимости от основных факторов, влияющих на развитие этих процессов. Пирогенная деструкция лесных экосистем неизбежно ведет к деградации горных почв, на восстановление которых после низовых пожаров уходят многие десятилетия.

Ключевые слова: сосново-лиственничные древостои, низовые пожары, деструкция, поверхностный жидкий и твердый сток, Байкальский регион.

DOI: 10.15372/SJFS20180604

ВВЕДЕНИЕ

Леса являются важнейшим компонентом природного комплекса Байкальского региона. От их состояния зависят стабильность выполнения ими средообразующих функций и чистота воды в оз. Байкал. Лесные экосистемы Прибайкалья подвержены интенсивному антропогенному воздействию, постоянно усиливающемуся в связи с растущим потоком слабо организованных туристов. В лесах увеличивается количество неконтролируемых источ-

ников огня, что особенно опасно для региона с преобладанием светлохвойных древесных насаждений.

К настоящему времени лидирующая роль пирогенного фактора в дигрессии лесов Байкальского региона представляется очевидной, так как их горимость здесь более чем на порядок превосходит общероссийский уровень. Пожары воздействуют на лесные экосистемы на большой территории, что абсолютно несоизмеримо с эволюционно обусловленной приспособленностью экосистем к их воздействию.

Прежде преобладали пожары, возникающие по природным причинам, в основном от гроз. Возникали они летом, в короткие перерывы между обильными дождями в Байкальском регионе, поэтому выгорали небольшие участки и преимущественно из-за низового огня невысокой интенсивности. Повторные пожары на одном и том же месте могли происходить через многие десятилетия, обычно не более одного пожара на протяжении жизни одного поколения хвойных пород.

Начальная фаза антропогенной череды пожаров связана с деятельностью поселенцев. Это были сравнительно немногочисленные пожары, возникавшие вблизи поселений. В годы строительства Транссибирской железнодорожной магистрали, а в последующем при освоении близлежащих лесных массивов происходили крайне губительные пожарные нарушения лесных экосистем. По этой причине произошло замещение коренных темнохвойных лесов лиственными на большей части Южного побережья Байкала (Панарин, 1979). В 1930-х гг. по мере интенсификации лесоразработок в светлохвойных лесах сосняки, представленные сосной обыкновенной *Pinus silvestris* L., и лиственничники, представленные лиственницей сибирской *Larix sibirica* Ledeb., после пожаров на большей части площадей замещались осиново-березовыми насаждениями из осины обыкновенной *Populus tremula* L. и березы плосколистной *Betula platyphylla* Sukacz.

В последнюю четверть века ситуация с природными пожарами на территории Прибайкалья значительно осложнилась. Так, тяжелые последствия вызвала пирогенная аномалия 2003 г. в буферной зоне Прибайкальского национального парка, Ольхонского и Голоустненского лесничеств. В последнем огнем было уничтожено около 20 % лесов. В Восточном Прибайкалье наиболее тяжкие последствия пожаров зарегистрированы в Байкальском и Кикинском лесничествах, а также в буферной зоне Забайкальского национального парка – в Усть-Баргузинском лесничестве. Особенно тяжелыми для Байкальской природной территории оказались последствия лесопирогенной аномалии 2015 г. По данным космической съемки она охватила свыше 2 млн га (без учета территории Монголии), т. е. более 10 % от общей площади.

Сохранившиеся к настоящему времени леса представляют собой фитоценозы со сложной историей формирования, обусловленной регулярным воздействием пирогенного фактора.

Низовые подстилочно-гумусовые пожары, преобладающие в Прибайкалье, в зависимости от интенсивности огня по-разному трансформируют основные компоненты лесных экосистем – почву, живой напочвенный растительный покров, формируют сукцессионные стадии их восстановления, влияют на послепожарное формирование насаждений и динамику прироста древостоев. При любом пожаре в сферу горения попадают напочвенный покров и органогенные горизонты почв. При высокой интенсивности пожара и полном сгорании поверхностного органогенного горизонта термическому воздействию подвергаются органо-минеральные или минеральные горизонты почв. Уничтожение огнем растительного покрова и лесной подстилки на горных склонах приводит к развитию ускоренной эрозии почв, ведущей к разрушению почвы как природного тела.

Влияние рубок леса на развитие ускоренной эрозии почв в Байкальском регионе отмечено в работах многих исследователей (Хуторцев, 1962; Ковалева, 1977; Краснощеков, 2004 и др.). Показано, что нерациональные способы рубки леса приводят к усилению эрозионных процессов, снижению качества воды в водотоках и нарушению водного баланса территории. Влияние лесных пожаров на развитие ускоренной эрозии почв, за редким исключением (Krasnoshchekov, 2013, 2018), изучено слабо.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты для изучения последствий воздействия низовых подстилочно-гумусовых пожаров на лесные экосистемы подобраны в южной части горного Прибайкалья. По лесорастительному районированию гор Южной Сибири (Типы..., 1980) исследования проводили в пределах Восточно-Прибайкальской и Западно-Прибайкальской лесорастительных провинций, в Улан-Бургасском, Хамар-Дабанском и Приморском лесорастительных округах, различающихся спектрами высотной поясности и особенностями отдельных поясов при наличии одной общей особенности – господстве таежных темно- и светлохвойных лесов. При маршрутных исследованиях на склонах разной крутизны и экспозиции в коренных и производных древостоях заложено 80 пробных площадей (ПП), в том числе 52 ПП на пожарницах разного возраста, пройденных огнем разной интенсивности. Их закладка и лесоводственно-геоботаническая характеристика выполнены согласно

методическим указаниям (Программа..., 1974; Анучин, 1982).

Комплекс наблюдений за лесоводственными последствиями низовых подстилочно-гумусовых пожаров проведен на постоянных ПП в смешанном сосново-лиственничном массиве на южном макросклоне хр. Б. Хамар-Дабан в Бабушкинском лесничестве (*первая серия ПП – 1–5*). Пожар действовал в середине мая на одном из отрогов этого хребта. Пожарище расположено на склоне крутизной 15° западной экспозиции на высоте 670 м над ур. м. Тип леса – сосняк рододендроновый бруснично-лиственнично-березовый с примесью лиственницы. Таксационная характеристика древостоев приведена в табл. 1.

ПП заложили вблизи кромки пожарища в непосредственной близости одна от другой. По допозжарному состоянию все участки относились к одному таксационному выделу, поэтому смежный участок в негоревшей части выдела служил общим контролем для всех поврежденных огнем насаждений. Интенсивность и вид пожара определяли по классификации Н. П. Курбатского (1962).

Исследованные участки отражают последствия низового пожара разной интенсивности двухлетней давности. На ПП 5 огневая обста-

новка была экстремальной – низовой пожар высокой интенсивности сопровождался локальными вспышками пламени в пологе древесных крон.

Вторую серию ПП (6–10), отражающих последствия низовых пожаров в средневозрастных и приспевающих сосняках рододендроновых бруснично-разнотравных и осочково-разнотравных, заложили в буферной зоне Прибайкальского национального парка (Голоустненское лесничество). Эти леса пострадали от лесопирогенной аномалии 2003 г. ПП 6 и 7 (в средневозрастном древостое) расположены на шлейфе в нижней части юго-западного склона крутизной 5° на высоте 550 м над ур. м. Другая группа объектов (ПП 8–10) находится на северо-восточном склоне крутизной 15–20° на высоте 730 м над ур. м. в приспевающем древостое. Причем на ПП 10 был низовой пожар высокой интенсивности с выходом в кроны, сходный по последствиям с прошедшим на ПП 5 из Хамар-Дабанской группы объектов.

Третью серию ПП (11–13) заложили на южной оконечности хр. Б. Хамар-Дабан в кедровнике кустарничково-зеленомошном на высоте 940 м над ур. м. (Слюдянское лесничество). Расположены они в приводораздельной выпо-

Таблица 1. Лесоводственно-таксационная характеристика древостоев на ПП

№ ПП	Интенсивность пожара	Состав древостоя	Возраст, лет	Класс бонитета	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Полнота	Запас древесины, м ³ /га
<i>Бабушкинское лесничество (хр. Б. Хамар-Дабан)</i>								
<i>Сосняки с примесью лиственницы рододендроновые брусничные</i>								
1	Контроль	8С2Лед. Б	69	IV	16.6	15.4	0.90	210
2	Слабая	7С3Лед. Б	73	IV	16.2	15.3	0.90	210
3	Средняя	7С3Лед. Б	73	IV	17.1	15.1	0.70	180
4	Высокая	8С2Лед. Б	73	IV	20.5	16.5	0.30	70
5	Высокая с выходом в кроны	7С3Лед. Б	73	IV	28.5	17.0	0.20	40
<i>Голоустненское лесничество (хр. Приморский)</i>								
<i>Сосняки с примесью лиственницы осочково-разнотравные</i>								
6	Контроль	4С6Лед. Б	65	II	22.4	20.1	0.70	289
7	Средняя	5С5Л	65	II	23.3	20.5	0.68	277
<i>Сосняки с примесью лиственницы рододендроновые бруснично-разнотравные</i>								
8	Контроль	8С2Лед. Б	95	III	25.4	23.1	0.88	345
9	Средняя	8С2Л + Б	95	III	24.7	22.2	0.82	323
10	Высокая	9С1Л	95	III	23.8	21.6	0.73	284
<i>Слюдянское лесничество (хр. Б. Хамар-Дабан)</i>								
<i>Кедровники кустарничково-зеленомошные</i>								
11	Контроль	10Кед.С, Б	120	IV	23.0	18.0	0.70	284
12	Средняя	10Кед.С, Б	120	IV	30.0	20.0	0.40	162
13	Высокая	10Кед.С, Б	120	IV	–	–	–	–

ложенной части склона северной экспозиции крутизной 5–6°.

На основании проведенных наблюдений за формированием жидкого и твердого поверхностного стока на горях разного возраста, пройденных пожарами разной интенсивности, создан банк данных по 9 параметрам, установленным по известным методикам (Молчанов, 1960; Курбатский, 1970; Вадюнина, Корчагина, 1986). Жидкий и твердый поверхностный сток измеряли объемным методом. В маршрутных исследованиях применяли метод искусственного дождевания микроплощадок (Швебс, 1974; Лебедев и др., 1979). В скобках указан диапазон изменения значений параметра в собранном материале: Y_1 – твердый сток, т/км² в год ($6 \leq Y_1 \leq 5800$); Y_2 – жидкий сток, мм/год ($2 \leq Y_2 \leq 340$); Y_3 – крутизна склона, град. ($2 \leq Y_3 \leq 30$); Y_4 – давность пожара, лет ($1 \leq Y_4 \leq 30$); Y_5 – доля погибших деревьев, % ($2 \leq Y_5 \leq 100$); Y_6 – суммарное увлажнение территории, мм ($300 \leq Y_6 \leq 950$); Y_7 – запас подстилки, т/га ($0.2 \leq Y_7 \leq 23$); Y_8 – влагоемкость подстилки, мм ($0.02 \leq Y_8 \leq 7$); Y_9 – водопроницаемость почв, мм/мин ($0.2 \leq Y_9 \leq 145$). Для статистической обработки данных и построения зависимостей использовали компьютерные программы Excel 2013 и Statistica 10. Все полученные коэффициенты и уравнения достоверны на уровне значимости $\alpha = 0.05$, общепринятом в практике лесобиологических исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Постпирогенная трансформация древостоев.

Наиболее полная картина последствий низового пожара в светлохвойных насаждениях, дифференцированного по интенсивности огневого воздействия, получена при исследовании на южном макросклоне хр. Б. Хамар-Дабан. Неравномерность горения под пологом крон при низовых

пожарах обусловлена несколькими причинами. Наиболее существенными являются количество, качество и состояние горючего материала, а также направление и скорость ветра. Общая картина огневых повреждений древесных стволов тоже находится в зависимости от перечисленных факторов. Широкое варьирование высоты обугливания корки – прямое следствие общей неравномерности горения на площади каждой ПП. В то же время прослеживается зависимость величины обгорания стволов от древесной породы (табл. 2).

На участках с высокой интенсивностью пожара почти все лиственницы имели невысокий нагар, в то время как сосновые стволы обгорели больше. Это результат морфологических различий корки – проводника горения по деревьям. По высоте нагара в связи с интенсивностью пожара центр тяжести рядов распределения смещается в сторону высокого обугливания соответственно нарастанию интенсивности огня.

При слабой интенсивности огня высота нагара на деревьях определяется скорее общей неравномерностью процесса горения, чем диаметром ствола. При порывах ветра нагар на тонких деревьях может оказаться выше, чем на крупных, оказавшихся на месте действия слабого огня при безветрии. Микрозавихрения пламенного потока, что мы наблюдали при проведении соответствующих экспериментальных выжиганий в сосняках Центрального Забайкалья (Евдокименко, 1975), возникают за толстыми стволами. Усилению горения в приствольной зоне способствуют увеличенные скопления горючих материалов.

Нагар на поверхности ствола дерева как показатель степени огневого воздействия служит внешним диагностическим признаком послепожарного состояния конкретных особей. Чем выше нагар, тем большая часть дерева подверга-

Таблица 2. Распределение деревьев по интервалам высоты нагара на стволах

Высота нагара, м	Сосна				Лиственница			
	№ ПП							
	2	3	4	5	2	3	4	5
< 1.0	98	11	–	–	35	2	–	–
1.1–2.0	62	43	6	2	13	6	–	–
2.1–3.0	16	65	47	10	4	9	–	–
3.1–4.0	–	39	72	35	–	7	2	2
4.1–5.0	–	17	41	59	–	5	2	–
> 5.0	–	15	48	88	–	21	43	64
Всего	176	190	214	174	52	50	47	66

лась губительному термическому воздействию. Но вследствие выраженной в лесных насаждениях изменчивости по росту дерева различаются по своей реакции на такие воздействия, которая зависит от толщины и протяженности слоя корки на стволах, а также от общей жизнеспособности древесных растений в момент пожара (в том числе от размеров и состояния кроны).

Повреждения корневых систем по всем участкам были невелики, так как прогорела в основном поверхность лесной подстилки. Корни не подвергались губительному термическому воздействию даже в гумусовом горизонте. Повреждения корневых лап огнем были единичными. У средневозрастных сосен и лиственниц в пристволевой части корни хорошо защищены сравнительно толстым слоем корки.

Сопоставление данных о высоте нагара и толщине коры (по модельным деревьям) свидетельствует, что при высокой интенсивности низового пожара ожоги камбия имели место среди деревьев из разных ступеней толщины. По большей части эти ожоги, особенно среди крупных деревьев, были локальными. Наиболее заметными были односторонние подсушины на ПП 4 и 5. На участке с низовым пожаром средней интенсивности они встречались спорадически на тонких деревьях, а на участке со слабым огненным воздействием отсутствовали.

Отмирание кроны, если судить по их внешнему виду, происходило по-разному. На участке с низовым пожаром слабой интенсивности кроны всех деревьев не имели признаков повреждения от термического воздействия. Сравнительно хорошо сохранился полог кроны и после огневого воздействия средней интенсивности. От перегрева отмирала хвоя нижних ветвей лишь у некоторых деревьев, преимущественно тонких.

Известно, что отмирание деревьев после повреждения пожаром происходит в течение одного-двух вегетационных периодов. За счет перегрева лубяных тканей возникают серьезные нарушения обмена веществ, что вызывает

вторичную денатурацию белков (Гирс, 1982). Обычно это сопровождается потерей устойчивости к стволовым вредителям. На ПП 4 и 5 с высокой интенсивностью пожара перегрев лубяных тканей ствола и нижних ветвей бесспорно имел место. Факелы пламени при типовых состояниях кромки пожара полностью пронизывали профиль подпологового пространства в насаждениях. Кроме того, над зоной огня сильно нагревается некоторая зона воздуха. Нагретая газовая среда губительно действует на луб ствола и нижних ветвей, а также приводит к отмиранию хвои. Ослабленные деревья на этих участках подвергались заселению насекомыми-ксилофагами, что усилило изреживание древостоев.

На ПП 5 с низовым пожаром крайне высокой интенсивности имел место локальный переход огня в кроны, от чего они обгорели частично, а в некоторых случаях полностью. Такие деревья к моменту наших наблюдений были в неохвоенном состоянии. Исключение составляли крупные лиственницы с восстановившейся хвоей. По состоянию обновления (восстановления) кроны такие деревья можно подразделить на категории по следующим признакам: 1) хвоя восстановилась только в пристволевой зоне кроны и преимущественно на новых послепожарных побегах; 2) восстановленная хвоя появилась на всем протяжении пристволевой зоны, а также на верхних ветвях; 3) хвоя восстановилась по всей кроне.

В процессе исследований определяли степень повреждения кроны на каждом дереве. Фактические данные в отношении сосновой части насаждения представляют большие вариационные ряды, по которым прослеживается связь размеров повреждений кроны с интенсивностью пожара и со ступенями толщины. Систематизированные соответствующим образом данные представлены в табл. 3.

Верхние пределы вариационных рядов ограничены ступенью 32 см. Это сделано для того,

Таблица 3. Средние размеры повреждения кроны (%) у сосен в зависимости от интенсивности низового пожара

№ ПП	Степень толщины, см							
	4	8	12	16	20	24	28	32
2	45	16	—	—	—	—	—	—
3	90	55	26	13	7	5	3	2
4	95	92	84	68	61	53	46	38
5	95	95	94	94	93	92	91	89

чтобы выделить рассматриваемую зависимость на примере совершенно однородной части древостоя, представленной одним поколением. Уменьшение размеров повреждений крон с увеличением диаметра стволов наблюдалось и за пределами 32 см.

Но на участках с высокой и экстремальной интенсивностью были отклонения от общей картины. Это объясняется как случайными причинами, так и флуктуациями пламени на прежних огневых травмах (подгарах и подсушинах) у единичных старых деревьев среди доминирующего поколения, от семян которых оно, по-видимому, и возникло. Известно, что ослабленные прежними пожарами деревья крайне болезненно реагируют на повторные огневые воздействия.

Для лесоводственной оценки отпада в древостоях целесообразно прибегнуть к некоторой условности, исходя из степени общей ослабленности древостоев. К категории отпада следует отнести деревья, у которых потеряно более 80 % хвои. При таком пороге соотношение жизнеспособных и отмирающих деревьев в сосновой части древостоев выглядит следующим образом:

№ ПП	Доля деревьев, %	
	жизнеспособных	отмирающих
2	100	–
3	85	15
4	27	73
5	6	94

Отмеченные соотношения наблюдались в конце второго вегетационного сезона после пожара. Характерно, что многие отмершие деревья на ПП 3 сохранили значительную часть хвои в кронах. Она полностью пожелтела, но большая ее часть не успела опасть с ветвей. По-видимому, это обстоятельство связано с деятельностью стволовых насекомых-вредителей. Все участки расположены рядом. После массового поселения стволовых вредителей на участке с экстремальным повреждением от пожара они могли перемещаться на ослабленные деревья, находящиеся на соседних участках.

Исследованиями, проведенными в сосновых лесах в Юго-Западном Прибайкалье (Голоустненское лесничество), установлена тесная зависимость пирогенных нарушений от возраста насаждений. Если после низового пожара средней интенсивности сумма отпада деревьев в 65-летнем насаждении превышала норму (контроль) в 4.2 раза, то в старшей (95-летней) возрастной

группе большая часть деревьев подобное огневое воздействие перенесла благополучно. Отмирали в основном маложизнеспособные деревья с тонкой корой из нижнего полога, причем из всех древесных пород, входящих в состав горевших насаждений, наиболее пострадала береза. Примесь березы к основному фитоценозу в пределах 10–15 % незначительно отразилась на общем количестве отпада из-за своей малочисленности.

В старшей возрастной группе послепожарный отпад хвойных деревьев на ПП 10 превышал контрольный уровень в 3.5 раза. Там же отмечено и существенное снижение относительной полноты до 0.73 против 0.88 на контроле. Заметим, что это результат воздействия низового пожара высокой интенсивности. Повторные пожары усугубляют дигрессию, снижают продуктивность древостоев. Отсюда и их низкие классы бонитета.

Толщина коры является своего рода интегральным морфологическим критерием, определяющим устойчивость древесных пород к огневому воздействию. Тонкая кора свойственна всем темнохвойным породам в лесах Байкальского региона: сосне кедровой сибирской *Pinus sibirica* Du Tour, ели сибирской *Picea obovata* Ledeb. и пихте сибирской *Abies sibirica* Ledeb. Их повреждаемость низовыми пожарами можно проиллюстрировать несколькими примерами по кедровым лесам Южного Прибайкалья (см. табл. 1). Так, в Быстринской даче Слюдянского лесничества 120-летний кедровый древостой наполовину поврежден низовым огнем средней интенсивности, а на участке, где действовал низовой пожар высокой интенсивности, погиб полностью.

Постпирогенная трансформация почв. При низовых подстильно-гумусовых пожарах в сферу горения всегда попадает живой напочвенный покров и поверхностный органогенный горизонт – лесная подстилка. При высокой интенсивности огня и полном сгорании подстилки происходит также трансформация верхних гумусово-аккумулятивных и минеральных горизонтов почв. Многочисленными исследованиями, проведенными в разных регионах России, установлено, что под влиянием пожаров в результате резкого изменения экологических условий, а также поступления большого количества золы на поверхность происходят изменения гидротермических и физико-химических свойств почв (Сапожников, 1976; Тарабукина, Саввинов, 1990; Gimeno-Garcia et al., 2004; Дымов и др.,

2014; Dymov et al., 2014; Krasnoshchekov, 2018; Чевычелов, Шахматова, 2018; Chevychelov, Shakhmatova, 2018 и др.). Огневая трансформация поверхностных органогенных горизонтов почв приводит также к ухудшению их физических и водно-физических свойств (Чевычелов, 2002; Mataix-Solera et al., 2011; Krasnoshchekov, 2013; Гынинова и др., 2016 и др.) и в итоге – к резкому возрастанию размеров жидкого поверхностного стока и развитию эрозионных процессов, приводящих к разрушению почвы как природного тела.

В горном Прибайкалье в почвенном покрове таежных кедровых лесов широко распространены подзолы и подбуры типичные и грубогумусовые.

Почвенный покров светлохвойных лесов в основном образован серогумусовыми типичными и глинисто-иллювирированными почвами. На крутых инсолируемых склонах развиваются литоземы серо- и темногоумусовые остаточно-карбонатные.

Как показали исследования, развитие эрозионных процессов на горях наблюдается в основном в виде плоскостного смыва и мелкоструйчатого размыва. Большое влияние на разрушение почвы оказывают также вывалы поврежденных и ослабленных огнем деревьев.

Часть смытого с поверхности водоразделов и верхних частей склонов почвенного мелкозема образует новый чехол делювиальных наносов на средних и нижних выложенных участках склонов. В результате этих процессов часто наблюдается погребение органогенных пирогенных и поверхностных гумусовых горизонтов, образование почв со сложным полициклическим профилем.

Однако очень часто в условиях горного рельефа на крутых склонах после низового пожара высокой интенсивности смывается весь почвенный мелкозем, образуются каменистые

россыпи (курумники), не зарастающие лесом неопределенно долгое время.

Практические задачи, выдвигаемые перед экологами и работниками лесного хозяйства по охране почвенного покрова лесных ландшафтов, не всегда удается решить описательными методами. В связи с этим возникает необходимость использования математического моделирования. Математическое моделирование сложных природных процессов и явлений позволяет не только получить прогнозные оценки исследуемых параметров, но и посредством численных экспериментов с моделями глубже раскрыть суть изучаемых явлений.

Исследовали зависимости размеров эрозии почв Y_1 (т/км² в год) и жидкого поверхностного стока Y_2 (мм/год) от крутизны склона Y_3 (градусы), давности пожара Y_4 (лет), доли погибших деревьев, % Y_5 , суммарного увлажнения территории Y_6 (мм/год), запаса подстилки Y_7 (т/га), ее влагоемкости Y_8 (мм) и водопроницаемости почв Y_9 (мм/мин).

Анализ матрицы парных коэффициентов корреляции показывает наличие статистически достоверной положительной корреляции (при 95 % доверительной вероятности) размера жидкого поверхностного стока с крутизной склона ($r = 0.38$), долей погибших деревьев ($r = 0.87$), величиной суммарного увлажнения ($r = 0.38$), тогда как с давностью пожара, запасом и влагоемкостью подстилки, а также с водопроницаемостью почв наблюдается отрицательная корреляция (табл. 4).

Между размерами твердого поверхностного стока, с одной стороны, величинами жидкого поверхностного стока, крутизной склона, долей погибших деревьев и величиной суммарного увлажнения – с другой, отмечается тесная положительная корреляция, а с давностью пожара, водопроницаемостью почв, запасом и влагоемкостью подстилки – отрицательная.

Таблица 4. Матрица парных коэффициентов корреляции

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9
Y_1	1.00	0.84	0.32	-0.41	0.74	0.48	-0.33	-0.22	-0.55
Y_2		1.00	0.38	-0.40	0.87	0.38	-0.32	-0.14	-0.70
Y_3			1.00	0.60	0.62	-0.02	0.64	0.79	-0.09
Y_4				1.00	-0.09	-0.28	0.96	0.93	0.55
Y_5					1.00	0.28	-0.05	0.14	-0.51
Y_6						1.00	-0.42	-0.34	-0.15
Y_7							1.00	0.95	0.52
Y_8								1.00	0.37
Y_9									1.00

Влагоемкость подстилки положительно коррелирует с ее запасом, давностью пожара и водопроницаемостью почв, а с количеством погибших деревьев и жидким поверхностным стоком – отрицательно.

Поиск структуры модели, позволяющей адекватно отражать важные моменты реально протекающих процессов формирования жидкого поверхностного стока и процессов эрозии почв, проводился путем комбинации методов включения и исключения факторов (Львовский, 1988). В результате получены уравнения

$$Y_2 = 47.32 - 0.69 Y_3 + 1.90 Y_5 + 0.05 Y_6 - 0.71 Y_9, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.869; \sigma = 31.8; F = 98.28,$$

где R^2 – индекс детерминации; σ – стандартная ошибка уравнения, мм/год; F – критерий Фишера;

$$Y_1 = 553.00 - 717.28 \ln Y_4 + 91.60 Y_7 + 3.39 Y_3^2 + 0.87 Y_6, \quad (2)$$

$$R^2 = 0.850; \sigma = 489; F = 51.10,$$

где σ – стандартная ошибка уравнения, т/км² в год.

Результаты численных экспериментов с моделью (1) свидетельствуют о том, что размеры жидкого поверхностного стока снижаются с

давностью пройденного пожара, но возрастают с увеличением суммарного увлажнения территории. При снижении водопроницаемости почв и большой доли погибших деревьев на пожарных жидкий поверхностный сток возрастает (рис. 1, а, б).

Анализ модели (2) свидетельствует о возрастании твердого стока с увеличением суммарного увлажнения и крутизны склона. С увеличением давности пожара твердый сток снижается (рис. 2, а).

Оценивая период восстановления противоэрозионных функций леса, необходимо отметить, что его продолжительность зависит от комплекса лесорастительных условий, характера и интенсивности пройденного низового пожара, степени уничтожения огнем живого напочвенного покрова, подроста и лесной подстилки.

На свежих гарях в зависимости от интенсивности огня поверхностный сток возрастает в 3–15 раз, а твердый – в десятки и сотни раз. Наблюдается резкое снижение твердого стока на 5–8-й год при условии успешного зарастания гарей растительностью. В то же время жидкий поверхностный сток на гарях сохраняется более длительное время, однако эрозионной опасности не представляет.

Для сравнения динамики затухания эрозионных процессов на вырубках и гарях проведены численные эксперименты с моделью (2)

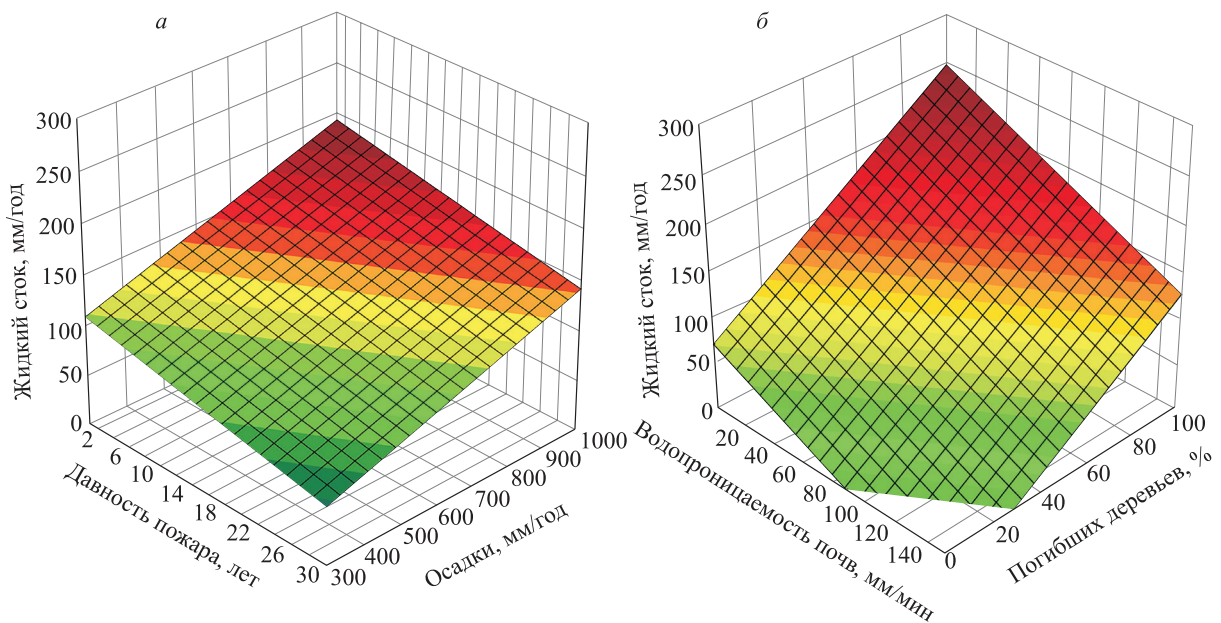


Рис. 1. Модели изменения жидкого поверхностного стока на пожарных в зависимости от: а – давности пройденного пожара и годовой суммы осадков при крутизне склона 20° и водопроницаемости почв 5 мм/мин; б – водопроницаемости почв и доли погибших деревьев при крутизне склона 20° и годовой сумме осадков 600 мм.

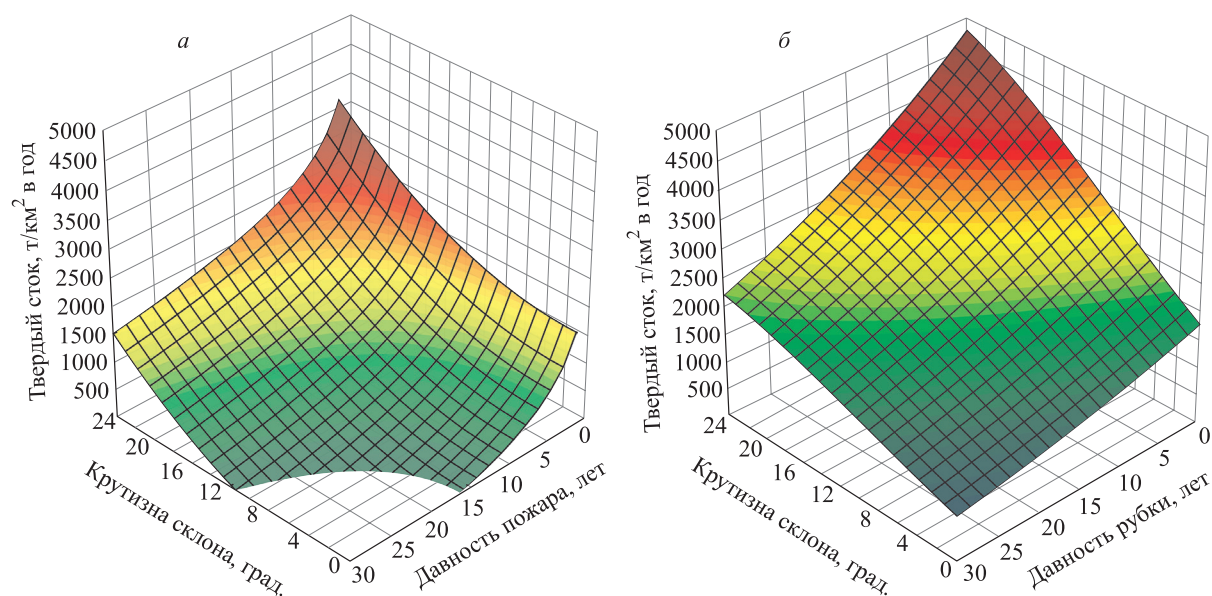


Рис. 2. Модели изменения твердого поверхностного стока в зависимости: *a* – на пожарищах от давности пожара и крутизны склона при годовой сумме осадков 600 мм и доле погибших деревьев 50 %; *б* – на сплошных вырубках от давности рубки и крутизны склона при доле эродированной поверхности 50 % и годовой сумме осадков 600 мм.

и моделью, полученной ранее, описывающей интенсивность развития эрозионных процессов на сплошных вырубках в Байкальском регионе, приведенных в работах (Краснощеков, Онучин, 1990; Онучин, Буренина, 2000). Численные эксперименты с моделями свидетельствуют о том, что интенсивность развития эрозионных процессов на горях значительно ниже, а их затухание протекает быстрее, чем на вырубках (рис. 2, *a*, *б*).

Необходимо пояснить, что на развитие ускоренной эрозии почв на горных склонах пожары оказывают не меньшее влияние, чем рубка леса. На вырубках поверхностный сток концентрируется на волоках и лесовозных дорогах и вызывает здесь линейные формы эрозии. На горях, как правило, нет дорожной сети, и здесь в большей мере развита поверхностная плоскостная и мелкоструйчатая эрозия.

На первый взгляд, казалось бы, что наиболее опасны линейная эрозия или размыв почв. На лесовозных дорогах и трелевочных волоках линейные формы эрозии хорошо видны. При плоскостной эрозии нарушения почвы поверхностным жидким стоком обнаруживаются лишь при полном разрушении поверхностных горизонтов. На пожарищах с поверхности почвы смываются продукты пиролиза, уменьшается мощность плодородного слоя, жидким стоком выносятся какое-то количество растворенных химических веществ, твердых мелких почвенных частиц.

Все это в виде взвесей попадает в ручьи и реки, становясь причиной их химического и бактериального загрязнения, ухудшающего качество воды (Лебедев и др., 1979). На пожарищах в значительной мере трансформируются водно-физические и физико-химические свойства почв, что приводит к ухудшению их лесорастительных свойств. При постановке исследований мы на пожарищах определяли интенсивность развития ускоренной эрозии почв – плоскостной и мелкоструйчатой и не учитывали размеры нарушения почв при вывалах ослабленных пожаром деревьев. На отдельных пожарищах разрушение почв и вынос мелкозема в результате вывала деревьев может быть более внушительным, чем даже на сплошных вырубках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Низовые подстильно-гумусовые пожары в горном Прибайкалье в зависимости от интенсивности огня в разной степени трансформируют лесные экосистемы. Изучены и систематизированы последствия разных по видам и интенсивности пирогенных воздействий на леса региона. Получены дифференцированные по отдельным поколениям и ступеням толщины структуры огневых повреждений и оценки жизненной способности деревьев. Проанализированы летальные пирогенные воздействия на деревья разных пород.

По данным лесопожарной статистики, около 95 % пожаров в байкальских лесах низовые. Отсюда вытекает и бытующее общее представление об устойчивости светлохвойных лесов, преобладающих в составе лесных массивов, к низовым пожарам. Однако из рассмотренных примеров видно, что не следует преувеличивать эту особенность сосновых и лиственничных лесов. Даже в рассматриваемых возрастных категориях от интенсивного огня погибают мелкие деревья с тонкой корой, т. е. молодняки сосны и лиственницы в возрасте 10–15 лет гибнут от низовых пожаров полностью даже при невысокой интенсивности огня.

В Прибайкалье низовые подстильно-гумусовые пожары резко изменяют морфологический облик верхней части почвенного профиля. В первую очередь эти изменения наблюдаются в поверхностных органогенных и грубогумусовых ($O + AO$) горизонтах почв за счет их выгорания. В результате изменяется характер типодиагностических поверхностных горизонтов почв. Формируются новые маломощные поверхностные органогенные пирогенные горизонты (O_{pit} ; OL/O_{pit} ; AO_{pit}), которые очень слабо противостоят смыву и размыву поверхностным жидким стоком.

В горных условиях при низовых пожарах высокой интенсивности наблюдаются процессы денудации на склонах (сноса и переотложения мелкозема), приводящие к формированию либо простых примитивных профилей с маломощными горизонтами, либо к формированию сложных полициклических профилей, часто с погребенными (реликтовыми) горизонтами. На участках гари с высокой интенсивностью пожара в отличие от слабоизмененных почв при низовых пожарах слабой интенсивности почвенный профиль не дифференцирован по гранулометрическому составу. Современный почвообразовательный процесс протекает на глинистом или суглинистом наносе, обогащенном илом и тонкопылевыми фракциями.

Предложенные математические модели позволяют рассчитывать допустимые размеры жидкого поверхностного стока и связанной с ним эрозии почв в зависимости от основных факторов, влияющих на развитие этих процессов. Это может иметь большое значение для противопожарной организации территории и при проведении лесохозяйственных и лесовосстановительных мероприятий на пожарищах.

Работа выполнена в рамках фундаментальных научных исследований по программам РАН № 0356–2016–0706. Номер государственной регистрации (ЦИТИС) АААА–А17–117101940014–9 «Теоретические основы сохранения экологического и ресурсного потенциала лесов Сибири в условиях возрастающего антропогенного прессы и климатических аномалий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анучин Н. П. Лесная таксация. Учебн. для лесохоз. вузов. 5-е изд., доп. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.
- Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследований физических свойств почв. Учеб. пособ. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
- Гирс Г. И. Физиология ослабленного дерева. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. 256 с.
- Гынинова А. Б., Дыржинов Ж. Д., Б.-Гончиков М. Н., Бешенцев А. Н. Антропогенная трансформация подтаежных почв дельты реки Селенги // Геогр. и природ. ресурсы. 2016. № 5. С. 83–91.
- Дымов А. А., Дубровский Ю. А., Габов Д. Н. Пирогенные изменения подзолов иллювиально-железистых (средняя тайга, Республика Коми) // Почвоведение. 2014. № 2. С. 144–154.
- Евдокименко М. Д. Огневые повреждения сосняков рододендроновых в Забайкалье // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1975. С. 207–220.
- Ковалева С. Р. Некоторые аспекты водной эрозии горнолесных почв Хамар-Дабана в условиях сплошных рубок // Эродированные почвы и пути повышения их производительности. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 50–66.
- Краснощечков Ю. Н. Почвозащитная роль горных лесов бассейна озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 224 с.
- Краснощечков Ю. Н., Онучин А. А. Использование метода математического моделирования при оценке эрозии почв на вырубках в горных лесах бассейна озера Байкал // Геогр. и природ. ресурсы. 1990. № 2. С. 57–60.
- Курбатский Н. П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962. 154 с.
- Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1970. С. 5–58.
- Лебедев А. В., Горбатенко В. М., Краснощечков Ю. Н., Решеткова Н. Б., Протопопов В. В. Средообразующая роль лесов бассейна озера Байкал. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 256 с.
- Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. Учеб. пособ. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.
- Молчанов А. А. Гидрологическая роль лесов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 484 с.

- Онучин А. А., Буренина Т. А. Антропогенная динамика противоэрозионных и водоохранно-защитных функций горно-таежных лесов Сибири // Лесоведение. 2000. № 1. С. 3–11.
- Панарин И. И. Леса Прибайкалья. М.: Наука, 1979. 263 с.
- Программа и методика биогеоценологических исследований / Под. ред. Н. В. Дылиса. М.: Наука, 1974. 403 с.
- Сапожников А. П. Роль огня в формировании лесных почв // Экология. 1976. № 1. С. 42–46.
- Тарабукина В. Г., Саввинов Д. Д. Влияние пожаров на мерзлотные почвы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 120 с.
- Типы лесов гор Южной Сибири / В. Н. Смагин, С. А. Ильинская, Д. И. Назимова, И. Ф. Новосельцева, Ю. С. Чередникова. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 336 с.
- Хуторцев И. И. Поверхностный сток и процессы эрозии почв на концентрированных вырубках в сосняках и лиственничниках Бурятии // Тр. Ин-та леса и древесины СО АН СССР. 1962. Т. 54. С. 235–277.
- Чевычелов А. П. Пирогенез и постпирогенные трансформации свойств и состава мерзлотных почв // Сиб. экол. журн. 2002. Т. 9. № 3. С. 273–278.
- Чевычелов А. П., Шахматова Е. Ю. Постпирогенные полициклические почвы в лесах Якутии и Забайкалья // Почвоведение. 2018. № 2. С. 243–252.
- Швебс Г. И. Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка (на примере Украины и Молдавии). Л.: Гидрометеиздат, 1974. 185 с.
- Chevychelov A. P., Shakhmatova E. Y. Postpyrogenic polycyclic soils in the forests of Yakutia and Transbaikal region // Euras. Soil Sci. 2018. V. 51. Iss. 2. P. 241–250 (Original Russian Text © A. P. Chevychelov, E. Y. Shakhmatova, 2018, publ. in Pochvovedenie. 2018. N. 2. P. 243–252.).
- Dymov A. A., Dubrovsky Yu. A., Gabov D. N. Pyrogenic changes in iron-illuvial podzols in the middle taiga of the Komi Republic // Euras. Soil Sci. 2014. V. 47. Iss. 2. P. 47–56 (Original Russian Text © A. A. Dymov, Yu. A. Dubrovsky, D. N. Gabov, 2014, publ. in Pochvovedenie. 2014. N. 2. P. 144–154).
- Gimeno-García E., Andreu V., Rubio J. L. Spatial patterns of soil temperatures during experimental fires // Geoderma. 2004. V. 118. Iss. 1–2. P. 17–38.
- Krasnoshchekov Yu. N. Transformation of soil-protective functions of mountain forest under the influence of forest fires in the central ecological zone of the Baikal natural territory // Geogr. Nat. Res. 2013. V. 34. Iss. 4. P. 356–363 (Original Russian Text © Yu. N. Krasnoshchekov, 2013, publ. in Geografiya i Prirodnye Resursy. 2013. V. 34. N. 4. P. 64–72).
- Krasnoshchekov Yu. N. Soils of mountainous forests and their transformation under the impact of fires in Baikal region // Euras. Soil Sci. 2018. V. 51. Iss. 4. P. 371–384 (Original Russian Text © Yu. N. Krasnoshchekov, 2018, publ. in Pochvovedenie. 2018. N. 4. P. 387–401).
- Mataix-Solera J., Cerdà A., Arcenegui V., Jordán A., Zavala L. M. Fire effects on soil aggregation: a review // Earth-Sci. Rev. 2011. V. 109. Iss. 1–2. P. 44–60.

POSTPYROGENIC DIGRESSION OF FOREST ECOSYSTEMS IN THE MOUNTAIN CIS-BAIKAL REGION

Yu. N. Krasnoshchekov, M. D. Evdokimenko, A. A. Onuchin

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

E-mail: kyn47@mail.ru; institute_forest@krc.krasn.ru; onuchin@ksc.krasn.ru

The results of long-term studies of the role of the pyrogenic factor in the dynamics of forest ecosystems in the mountain Cis-Baikal region are considered. The consequences of surface fires in the full range of their intensity, from weak to extremely strong, are analyzed. The damage characteristics in pine and larch stands, differentiated by the types and degrees of fire impact, were obtained: burning and drying on stems, death of crowns with weakening the viability of trees, anomalous thinning. Fire scars on the surface of the tree stems, as an indicator of the degree of fire impact, serves as an external diagnostic sign of the post-fire condition of specific individuals. The higher on the stem fire scars are, the greater part of the tree was exposed to harmful thermal effects. But due to the variability in growth expressed in forest stands, trees differ in their reaction to such impacts. Young Scots pine *Pinus sylvestris* L. and the Siberian larch *Larix sibirica* Ledeb. tree stands are largely damaged and, as a rule, die after the exposure to medium-intensity fires, and at the age of 10-15 years even die after low intensity surface fires. The most vulnerable to fires are tree species with thin bark, such as Siberian stone pine *Pinus sibirica* Du Tour, Siberian spruce *Picea obovata* Ledeb., Siberian fir *Abies sibirica* Ledeb. and flat-leaved birch *Betula platyphylla* Sukacz. It is noted that 100-120-year-old Siberian stone pine stands are largely damaged by low-intensity surface fires, and are completely damaged after intense surface fires. The quantitative indices of liquid and solid surface runoff at the burnings are given. Mathematical models for the formation of liquid surface runoff and associated erosion of soils on burned areas are proposed, depending on the main factors affecting the development of these processes. The pyrogenic destruction of forest ecosystems inevitably results in the degradation of mountain soils, the restoration of which after surface fires takes many decades.

Keywords: *pine-larch tree stands, surface fires, destruction, surface liquid and solid runoff, Baikal region.*

How to cite: *Krasnoshchekov Yu. N., Evdokimenko M. D., Onuchin A. A. Postpyrogenic digression of forest ecosystems in the mountain Cis-Baikal region // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2018. N. 6: 46–57 (in Russian with English abstract). DOI: 10.15372/SJFS20180604*