

Ю.Н. КРАСНОЩЁКОВ

Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН — Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28, Россия, kyn47@mail.ru

ВЛИЯНИЕ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ НА ЭРОЗИЮ ПОЧВ В ГОРНЫХ ЛЕСАХ ПРИБАЙКАЛЬЯ

Рассмотрены данные экспериментальных исследований по влиянию пожаров на развитие эрозионных процессов в горных лесах Прибайкалья. Приведены количественные показатели жидкого и твердого поверхностного стока, формирующегося на гаях в зависимости от крутизны склонов, интенсивности и давности пройденных пожаров. Показано, что нарушение почвозащитного растительного и органогенного слоев почв на горных склонах способствует интенсивному развитию плоскостного смыва мелкозема, что приводит к изменению направленности и темпов почвообразования в иных условиях развития геохимических и биогеохимических процессов. На гаях в значительной мере трансформируются гидрофизические и физико-химические свойства почв, приводящие к ухудшению их лесорастительных свойств. Дана морфологическая характеристика пирогенно-трансформированных почв на пожарищах 5–8-летней давности, пройденных огнем разной интенсивности. В горных условиях при низовых пожарах высокой интенсивности наблюдаются процессы сноса и переотложения мелкозема на склонах, приводящие к формированию либо простых примитивных профилей с маломощными горизонтами, либо сложных полициклических профилей, часто с погребенными (реликтовыми) горизонтами. Предложены математические модели, описывающие формирование жидкого и твердого поверхностного стока на гаях в зависимости от основных факторов, обуславливающих этот процесс. Сделан вывод, что пирогенная деструкция лесных экосистем неизбежно ведет к деградации горных почв, на восстановление которых после низовых пожаров уходят многие десятилетия.

Ключевые слова: лесные почвы, морфология почв, водопроницаемость почв, поверхностный жидкий сток, поверхностный твердый сток, математические модели.

Yu.N. KRASNOSHCHKOV

Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28, Russia, kyn47@mail.ru

INFLUENCE OF GROUND FIRES ON SOIL EROSION IN MOUNTAIN FORESTS OF CISBAIKALIA

Data of experimental studies on the influence of fires on the development of erosion processes in the mountain forests of Cisbaikalia are considered. The quantitative indicators of liquid and solid surface runoff formed on burns, depending on the steepness of the slopes and on the intensity and duration of the fires, are given. It is shown that the violation of the soil-protective plant and organogenic layer of soils on mountain slopes contributes to an intense development of sheet wash of fine-grained earth, which leads to a change in the direction and rate of soil formation under other conditions of the development of geochemical and biogeochemical processes. The water-physical and physico-chemical properties of soils are significantly transformed on burns, leading to a deterioration of their forest-growing properties. The morphological characteristics of pyrogenically transformed soils on the sites affected by fire of different intensity 5 to 8 years ago are given. In mountain conditions, during ground fires of high intensity, the processes of drift and redeposition of fine-grained earth on the slopes are observed, leading either to the formation of simple primitive profiles with thin horizons or to the formation of complex polycyclic profiles, often with buried (relict) horizons. Mathematical models are proposed, which describe the formation of liquid and solid surface runoff on the burns, depending on the main factors that determine this process. Pyrogenic destruction of forest ecosystems inevitably leads to the degradation of mountain soils, which take many decades to restore after ground fires.

Keywords: forest soils, soil morphology, water permeability of soils, surface liquid runoff, surface solid runoff, mathematical models.

ВВЕДЕНИЕ

Лесные почвы в Прибайкалье подвержены регулярному воздействию пожаров. По мере усиления антропогенной нагрузки на лесные массивы деструктивная роль пожаров среди прочих неблагоприятных воздействий становится преобладающей.

Процессы пирогенеза представляют собой широко распространенное явление, оказывающее огромное влияние на процессы почвообразования. В литературе неоднократно отмечалось, что пожары и, вообще, огонь следует включить в число важных факторов, влияющих на развитие и функционирование лесных почв [1, 2].

Многочисленными исследованиями, проведенными в разных регионах Евразии, установлено, что под влиянием пожаров в результате резкого изменения экологических условий, а также поступления большого количества золы на поверхность изменяются химические и физико-химические свойства почв [3, 4]. Огневая трансформация поверхностных органогенных горизонтов почв также приводит к ухудшению их физических и гидрофизических свойств [5, 6] и, в итоге, к резкому возрастанию размеров жидкого поверхностного стока и развитию эрозионных процессов.

По данным И.М. Габбасовой и др. [7], в горных сосновых лесах Южного Урала, где в почвенном покрове распространены серые и темно-серые почвы, низовые пожары высокой интенсивности на крутых склонах приводят к развитию интенсивных эрозионных процессов, размеры которых достигают 150–540 т/га в год. В горах штата Колорадо (США) пожары высокой интенсивности увеличивают твердый сток на склонах в 10–26 раз по сравнению с негорелыми [8]. В средиземноморских лесных экосистемах (Израиль) с преобладанием сосны после пожара эрозионные процессы на грязах идут в пять раз интенсивнее [9], чем на аналогичных участках, не подвергшихся пожарам.

Пирогенез почв горных лесов Прибайкалья и Забайкалья изучался и ранее. В большинстве работ, посвященных исследованиям влияния огня на почву, рассматривается пирогенная трансформация отдельных почвенных свойств или их совокупности [10–12]. Несмотря на ключевую роль пирогенного фактора в современной динамике лесных экосистем, его влияние на развитие ускоренной эрозии почв, за редким исключением [13], изучено слабо.

Цели данной работы — анализ и обобщение экспериментальных данных, полученных в результате многолетних исследований влияния низовых пожаров разной интенсивности и давности, на морфологические, физические и гидрофизические свойства почв горных лесов региона; установление масштабов и интенсивности развития эрозии почв на грязах; разработка математических моделей, описывающих формирование жидкого и твердого поверхностных стоков на грязах в зависимости от основных факторов, обуславливающих эти процессы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

По лесорастительному районированию гор Южной Сибири исследования проводились в пределах Восточно-Прибайкальской и Западно-Прибайкальской лесорастительных провинций (рис. 1), в Улан-Бургасском, Хамар-Дабанском и Приморском лесорастительных округах, различающихся спектрами высотной поясности и особенностями отдельных поясов при наличии одной общей особенности — господства таежных темнохвойных и светлохвойных лесов.

Исходным материалом для написания работы послужили данные многолетних исследований автора, проводимых в Байкальском регионе. В горных лесах Прибайкалья на склонах разной крутизны и экспозиции в коренных и производных древостоях заложено около 90 пробных площадей, в том числе 52 — на грязах разного возраста, пройденных огнем разной интенсивности. Закладка пробных площадей, а также их лесоводственно-геоботаническая характеристика выполнены согласно методическим указаниям [15]. На гаревых участках устанавливались давность и сила пожара, определяемые по высоте нагара (обугливания) на стволах деревьев, степени повреждения крон, полноте сгорания горючих материалов и др. [16].

На пробных площадях изучены почвы, сделано их морфологическое описание и отобраны почвенные образцы из разрезов на химический и физико-химический анализ. Опорные почвенные разрезы закладывались на участках с разной степенью нарушенности почвенного покрова (эталон — под пологом леса рядом с гарью). На грязах они располагались с учетом геоморфологической привязки эталонного разреза (положение в рельефе — верхняя, средняя, нижняя часть склона, его крутизна, экспозиция и т. д.). На основании сопоставления опорного и эталонного разрезов устанавливалась степень нарушенности поверхностных органогенных (О, АО, Т), гумусовых (АУ, АУ, Н) и минеральных горизонтов. Названия почв даны по «Классификации и диагностике почв России» [17].

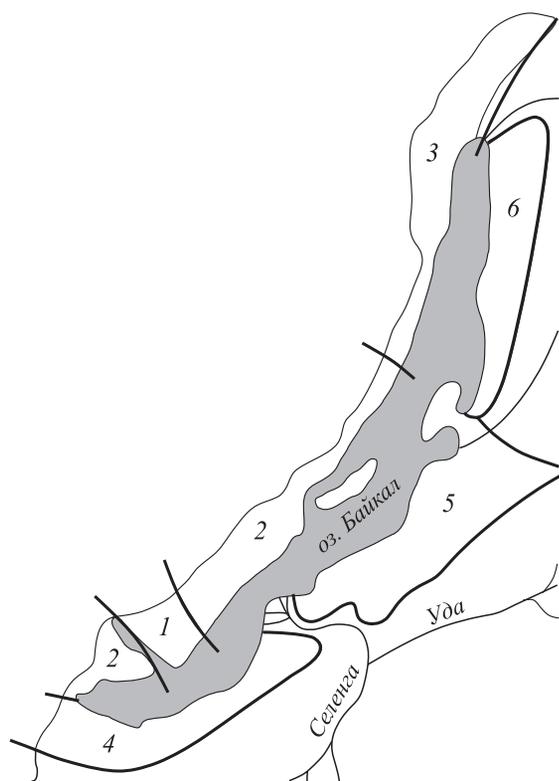


Рис. 1. Схема лесорастительного районирования Прибайкалья [14].

1 — Ангарская плоскогорная провинция. Западно-Прибайкальская горная провинция. Округа: 2 — Приморский, 3 — Байкальский. Восточно-Прибайкальская горная провинция. Округа: 4 — Хамар-Дабанский, 5 — Улан-Бургасский, 6 — Баргузинский.

Для модельного описания процессов формирования жидкого и твердого поверхностного стоков использована база, собранная в результате многолетних исследований, в которой приведены экспериментальные данные, систематизированные по трем высотнопоясным комплексам (ВПК) типов леса: горно-таежному кедровому, горно-таежному сосновому и подтаежно-лесостепному сосновому.

На основании наблюдений, проведенных под пологом не тронутых пожарами древостоев, одной пробной площади соответствует совокупность девяти параметров, установленных по известным методикам [18–20]. Жидкий и твердый поверхностный сток измерялся объемным методом. В маршрутных исследованиях применялся метод искусственного дождевания микроплощадок. В скобках указан диапазон изменения значений параметра в собранном материале: P_1 — твердый сток, т/км² в год ($0,001 < P_1 < 50$); P_2 — жидкий сток, мм/год ($0,05 < P_2 < 100$); P_3 — запас подстилки, т/га ($1,6 < P_3 < 30,9$); P_4 — влагоемкость подстилки, мм ($0,2 < P_4 < 19,3$); P_5 — водопроницаемость почв, мм/мин ($40 < P_5 < 260$); P_6 — крутизна склона, град. ($5 < P_6 < 30$); P_7 — суммарное увлажнение, мм/год ($360 < P_7 < 1020$); P_8 — полнота древостоя, доля от единицы ($0,4 < P_8 < 1,1$); P_9 — проективное покрытие напочвенного покрова, % ($25 < P_9 < 100$).

На гарях разного возраста, пройденных пожарами разной интенсивности, одной пробной площади соответствует также совокупность девяти параметров: Y_1 — твердый сток, т/км² в год ($0,6 \leq Y_1 \leq 6000$); Y_2 — жидкий сток, мм/год ($2 \leq Y_2 \leq 340$); Y_3 — крутизна склона, град. ($5 \leq Y_3 \leq 30$); 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, мм/год ($360 \leq Y_6 \leq 1020$); 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Один из интегральных показателей, влияющих на интенсивность развития эрозионных процессов, представляет собой поверхностный жидкий сток, состоящий из части непоглощенных растительностью и почвой атмосферных осадков. Процесс формирования жидкого и твердого поверхностного стока связан с климатическими, геоморфологическими, почвенными и биогенными факторами. В пределах отдельного ВПК типов леса формирование жидкого и твердого поверхностного стока зависит от полноты, состава и возраста насаждений, проективного покрытия живого напочвенного покрова, типа леса, физических и гидрофизических свойств лесных подстилок и почв. Все эти факторы существенно изменяются в процессе онтогенеза лесных экосистем [21].

Горно-таежные кедровые леса в Прибайкалье приурочены к абсолютным высотам 600–1300 м. Их фитоценотическая особенность — преобладание кустарничково-зеленомошных типов леса.

В почвенном покрове широко распространены альфегумусовые почвы — подзолы и подбуры типичные, грубогумусовые и перегнойные.

Водопроницаемость — одно из важнейших гидрофизических свойств почв, непосредственно влияющее на размеры поверхностного жидкого стока. Выявлена тенденция снижения водопроницае-

мости почв от водоразделов и верхних частей склонов к нижним частям склонов и понижениям, что связано с изменением мощности и состава рыхлых четвертичных отложений.

Высокими инфильтрационными свойствами (более 200 мм/мин) характеризуются почвы водоразделов, где по гранулометрическому составу преобладают сильнощебнистые супесчаные и легкосуглинистые разновидности. В средних частях склонов она изменяется от $38,7 \pm 4,5$ до $57,0 \pm 4,0$ мм/мин. В нижних частях склонов второстепенных хребтов — $18,1 \pm 3,6$ мм/мин.

В пределах горно-таежного кедрового ВПК типов леса запасы и влагоемкость подстилок колеблются в широких пределах. Так, наименьшее количество подстилки содержится в кедровниках кустарничково-зеленомошных и чернично-зеленомошных 60–80-летнего возраста — $9,2 \pm 1,4$ т/га, а ее влагоемкость составляет $6,5 \pm 0,8$ мм. В насаждениях 110–150-летнего возраста запасы и влагоемкость подстилок изменяются, соответственно, от 24,2 до 29,4 т/га и от 9,8 до 11,3 мм. Запас подстилки в кедровниках 200–250-летнего возраста составляет $26,6 \pm 2,5$ т/га, а ее влагоемкость $17,4 \pm 2,2$ мм.

Экспериментально установлено, что в летний период дожди силой до 5 мм под пологом кедровых лесов сток не образуют. Основные стокообразующие осадки — дожди средней интенсивности (>10 мм), а также дожди ливневого характера. В рассматриваемых лесах поверхностный сток характеризуется очень малыми величинами и не превышает 2–3 % от суммы осадков. Модуль твердого стока составляет $0,001–3,5$ т/км² в год.

В структуре почвенного покрова горно-таежного (700–1000 м абс. выс.) и подтаежно-лесостепного (460–700 м абс. выс.) светлохвойных ВПК типов леса широко распространены серогумусовые почвы. На крутых каменистых склонах формируются литоземы.

Высокой (провальной) водопроницаемостью в пределах ВПК характеризуются хрящевато-супесчаные и легкосуглинистые разновидности серогумусовых почв верхних и средних частей склонов хребтов. Коэффициент инфильтрации этих почв изменяется от $61,4 \pm 5,9$ до $85,0 \pm 8,6$ мм/мин. В средних частях склонов почвы более тяжелого гранулометрического состава имеют инфильтрацию, которая равна $27,5 \pm 5,2$ мм/мин. В нижних частях склонов почвы как таежных, так и подтаежно-лесостепных сосняков обладают инфильтрацией $10,4 \pm 2,3$ — $16,5 \pm 2,2$ мм/мин.

Наибольшими запасами подстилки ($18,5 \pm 5,6$ т/га) выделяются сосняки бруснично-разнотравные и рододендроновые бруснично-разнотравные 180–200-летнего возраста, их влагоемкость равна $6,8 \pm 0,7$ мм. Относительно меньшими запасами и влагоемкостью подстилки отличаются сосновые насаждения 80–100-летнего возраста, соответственно, $11,1 \pm 1,2$ т/га и $3,3 \pm 0,4$ мм.

Величина поверхностного жидкого стока под пологом леса не превышает в большинстве случаев 5–10 % от суммы осадков. Модуль твердого стока в зависимости от крутизны склона изменяется от 0,01 до 50,0 т/км² в год.

Установлены зависимости между поверхностным твердым (P_1) и жидким (P_2) стоком в отдельных ВПК типов леса (рис. 2). Высокие значения R^2 (0,753–0,880) наблюдаются уже в простейшем случае

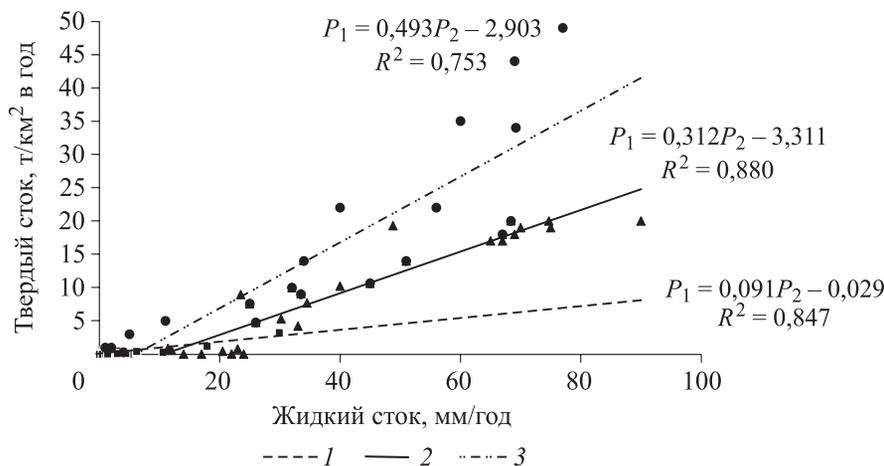


Рис. 2. Зависимости изменения поверхностного твердого стока (P_1) от жидкого (P_2) в различных высотных поясах комплексов типов леса Прибайкалья.

Высотные пояса комплексов типов леса: 1 — таежный кедровый; 2 — таежный сосновый; 3 — подтаежно-лесостепной сосновый.

линейных зависимостей ($P_1 = a + bP_2$). Четко просматривается пороговый эффект возникновения твердого стока, начиная с определенных для каждого ВПК значений $P_{2\text{порог}} > 0$. Так, в подтаежно-лесостепном сосновом твердый сток возникает при $P_2 > 3$ мм; в таежном сосновом — при $P_2 > 4$ мм; таежном кедровом ВПК — при $P_2 > 5$ мм.

Помимо уже известных зависимостей (величины осадков, крутизны склона и др.) важно было обнаружить влияние биогенного фактора на формирование поверхностного жидкого и твердого стока. Ранее в качестве ключевых переменных нами использовались проективное покрытие живого напочвенного покрова и полнота древостоев [21]. В дальнейшем установлено, что наряду с этими показателями информативными переменными являются также запас (P_3) и влагоемкость (P_4) подстилки, позволяющие судить о формировании тех или иных размеров поверхностного жидкого стока и связанных с ними изменениях эрозионных процессов. Для рассматриваемых ВПК использования данных о влагоемкости лесной подстилки вполне достаточно ($R^2 = 0,603-0,702$), хотя этот фактор достоверно объясняет далеко не всю изменчивость формирования жидкого стока (рис. 3).

Низовые пожары, преобладающие в данном регионе, в зависимости от интенсивности огня по-разному трансформируют основные компоненты лесной экосистемы. Независимо от интенсивности пожара в сферу горения всегда попадают напочвенный покров и поверхностные органогенные горизонты почв. Установлено, что в кедровых лесах Прибайкалья при слабой и средней интенсивности пожара мощность этих горизонтов уменьшается на 23–25 %, а при высокой — на 80 %. В таежных, подтаежных и подтаежно-лесостепных светлохвойных травяных лесах при пожарах средней и высокой интенсивности мощность органогенного горизонта снижается до 70–80 %, а в отдельных случаях сгорает полностью до минеральной части профиля.

При низовых пожарах заметно возрастает плотность сложения и уменьшается общая пористость верхних горизонтов почв. Так, значительное изменение плотности сложения сухой почвы и общей пористости отмечено на свежих и трехлетних гарях. По сравнению с лесом, где плотность сложения в слое почвы 0–5 см равна 0,36–0,42 г/см³, в слое 5–20 см она составляет 0,80–1,14, на гарях 0,50–0,97 и 0,88–1,22 г/см³ соответственно. Общая пористость в слое 0–5 см в лесу 80–83 %, в слое 5–20 см — 55–64 %, на гарях — 56–76 и 50–61 % от объема соответственно. На старых гарях (8–10-летних) плотность сложения слоя почв 0–5 см составляет 0,65–0,75 г/см³, а общая пористость — 60–70 %. На старых гарях относительно высокие показатели плотности сложения и низкие — общей пористости связаны, в большей мере, с проявлением на горных склонах педотурбационных и деструктивных процессов.

Изменение общих физических свойств почв на гарях приводит к снижению их водопроницаемости. Так, на свежих и трехлетних гарях кедровников кустарничково-зеленомошных, на участках, пройденных огнем высокой и средней интенсивности, она изменяется от 0,4 до 15,0 мм/мин. На пятилетних гарях на участках, пройденных пожарами слабой интенсивности, водопроницаемость почв

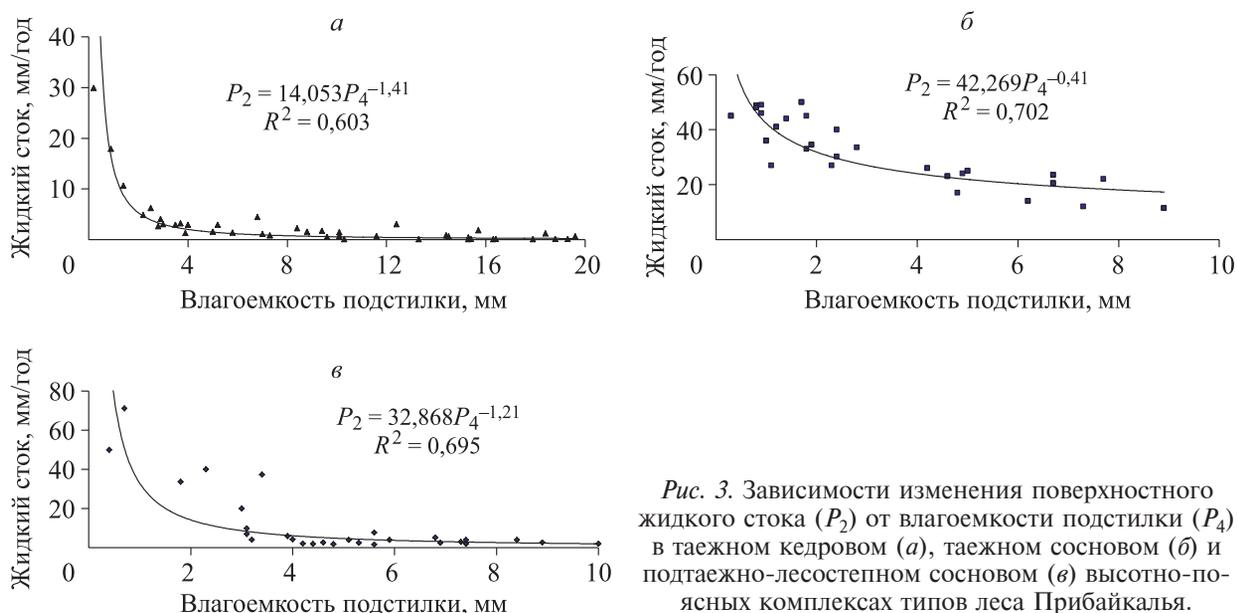


Рис. 3. Зависимости изменения поверхностного жидкого стока (P_2) от влагоемкости подстилки (P_4) в таежном кедровом (а), таежном сосновом (б) и подтаежно-лесостепном сосновом (в) высотно-по-ясных комплексах типов леса Прибайкалья.

составляет 62–120 мм/мин, средней интенсивности — 36–80, высокой — 5,8–24,0 мм/мин. На горях 10–15-летнего возраста почвы имеют водопроницаемость 40–85 мм/мин. Водопроницаемость снижается также и за счет теплового разрушения агрегатов и осаждения слоя золы на поверхности почвы, что, в свою очередь, усиливает ее водоотталкивающие свойства [22].

В пределах подтаежных и подтаежно-лесостепных сосновых и лиственничных лесов на свежих и трехлетних горях водопроницаемость почв уменьшается до 0,2–4,0 мм/мин, на 5–8-летних — до 3,2–11,8 мм/мин. Почвы 10–15-летних гарей имеют водопроницаемость 10,8–28,5 мм/мин. В данном случае относительно плохая водопроницаемость почв даже на горях 10–15-летнего возраста связана с их эродированностью, а, следовательно, с невозстановившимися физическими и гидрофизическими свойствами.

Ухудшение свойств почв на горях сопровождается резким возрастанием размеров жидкого поверхностного склонового стока и развитием эрозионных процессов, приводящих к разрушению почвы как природного тела.

Как показали исследования, развитие эрозионных процессов на горях наблюдается преимущественно в виде плоскостного смыва и мелкоструйчатого размыва. Кроме того, большое влияние на разрушение почвы здесь оказывают вывалы поврежденных и ослабленных огнем деревьев.

В таежном кедровом ВПК типов леса на свежих горях на склонах крутизной 5–15° суммарный размер эрозии изменяется от 600 до 1800 т/км² в год. Наиболее интенсивный снос почвы наблюдается на свежих горях, пройденных пожарами высокой и средней интенсивности. Здесь при поверхностном стоке 320–350 мм в год суммарный размер эрозии на склонах 15–25° достигает 3000–3400 т/км². На горях 3–5-летнего возраста на склонах крутизной 5–15° суммарная эрозия равна 250–600 т/км², а при крутизне 15–25° — 1000–1500 т/км² в год. На старых горях (старше 10 лет) (при условии восстановления на них растительности) эрозионные процессы незначительны и не превышают естественную эрозию под пологом леса.

На свежих горях таежных и подтаежно-лесостепных сосновых лесов на склонах крутизной 5–15° суммарный размер эрозии составляет 800–1100 т/км², а при крутизне 15–25° при поверхностном жидком стоке 230–250 мм он увеличивается до 3500–6000 т/км² в год. На 3–5-летних горях на склонах 5–15° суммарный размер эрозии равен 680–950 т/км², а при крутизне 15–25° — 1400–1900 т/км² в год. Относительно длительное время эрозионные процессы развиты на старых горях (10–15-летних), пройденных повторными пожарами. Даже на склонах 15–25° суммарный размер эрозии при стоке 50–90 мм составляет 270–350 т/км² в год. На старых же горях, где процессы восстановления растительности проходят удовлетворительно, интенсивность развития эрозии не выше, чем на облесенных территориях.

Практические задачи, которые ставятся 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 [23].

Анализ матрицы парных коэффициентов корреляции (табл. 1) показывает наличие статистически достоверной положительной корреляции (при 95%-й доверительной вероятности) размера жидкого поверхностного стока (Y_2) с крутизной склона ($r = 0,38$), процентом погибших деревьев ($r = 0,87$),

Таблица 1

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

величиной суммарного увлажнения ($r = 0,38$), тогда как с давностью пожара ($r = -0,40$), запасом ($r = -0,32$) и влагоемкостью подстилки ($r = -0,14$), а также с водопроницаемостью почв ($r = -0,70$) наблюдается отрицательная корреляция.

Между размерами твердого поверхностного стока (Y_1), с одной стороны, величинами жидкого поверхностного стока (Y_2), крутизной склона (Y_3), % погибших деревьев (Y_5) и величиной суммарного увлажнения (Y_6) — с другой, отмечается тесная положительная корреляция, а с давностью пожара (Y_4), водопроницаемостью почв (Y_9), запасом (Y_7) и влагоемкостью (Y_8) подстилки существует отрицательная корреляция.

Влагоемкость подстилки положительно коррелирует с ее запасом, давностью пожара и водопроницаемостью почв. С количеством погибших деревьев и жидким поверхностным стоком она коррелирует 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 [24]. 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 — коэффициент множественной 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 (рис. 4, а). При снижении водопроницаемости почв и наличии большой доли погибших деревьев на горях жидкий поверхностный сток возрастает (см. рис. 4, б).

Анализ модели (2) свидетельствует о возрастании твердого стока с увеличением суммарного увлажнения и крутизны склона. С увеличением давности пожара твердый сток снижается (рис. 5, а).

Оценивая период восстановления противозерозионных 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 горях 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 горях сохраняется более длительное время, однако эрозионной опасности он не представляет.

Для сравнения динамики затухания эрозионных процессов на вырубках и горях были проведены численные эксперименты с полученной моделью (2) и моделью, полученной ранее, описывающей интенсивность развития эрозионных процессов на сплошных вырубках в Байкальском регионе [25].

Численные эксперименты с моделями свидетельствуют о том, что интенсивность развития эрозионных процессов на горях значительно ниже, а их затухание протекает быстрее, чем на вырубках (см. рис. 5, а, б).

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

На первый взгляд кажется, что наиболее опасна линейная эрозия или размыв почв. На лесовозных дорогах и трелевочных волоках линейные формы эрозии достаточно хорошо видны. При плоскостной эрозии нарушения почвы поверхностным жидким стоком обнаруживаются лишь при полном разрушении поверхностных горизонтов. На пожарищах смываются продукты пиролиза с поверхности почвы, уменьшается мощность плодородного слоя, выносятся жидким стоком какое-то количество растворенных химических веществ, твердых мелких почвенных частиц. Все это в виде взвесей попадает в ручьи и реки и приводит к их химическому и бактериальному загрязнению, снижая качество воды.

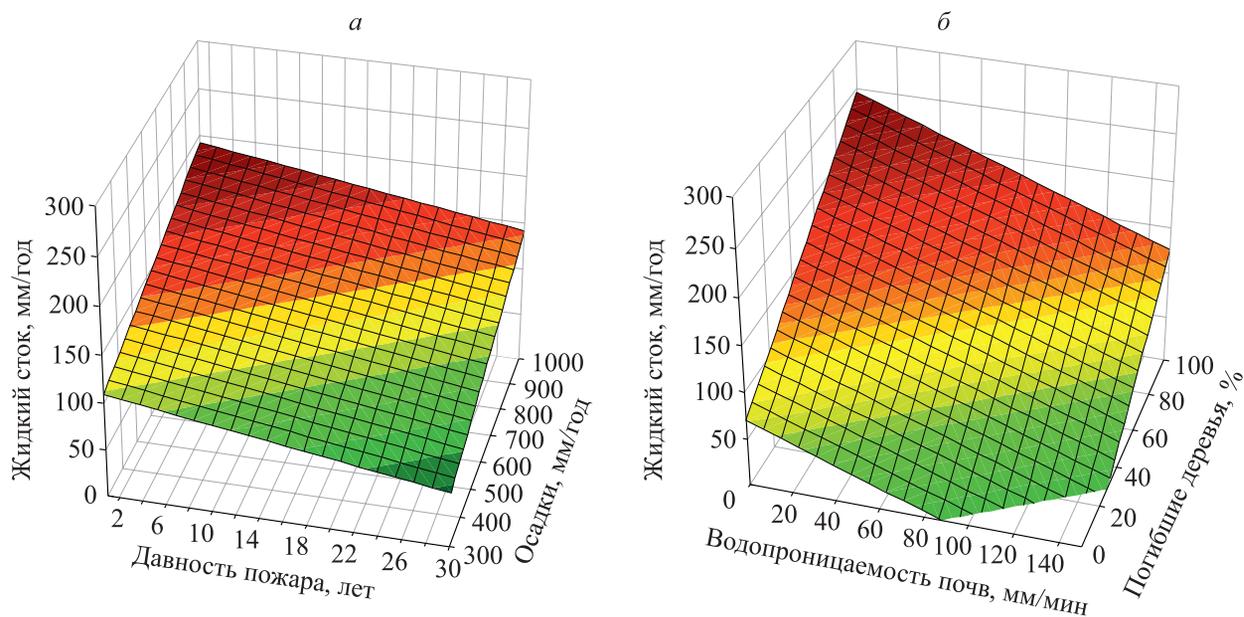


Рис. 4. Модели изменения жидкого поверхностного стока на горях Прибайкалья.

Модели изменения жидкого поверхностного стока на горях: *a* — от давности пройденного пожара и годовой суммы осадков, при крутизне склона 20° и водопроницаемости почв 5 мм/мин; *б* — от водопроницаемости почв и доли погибших деревьев, при крутизне склона 20° и годовой сумме осадков 600 мм.

Следует также отметить, что в ходе исследований мы определяли интенсивность развития ускоренной эрозии почв (ее плоскостная и мелкоструйчатая формы) на горях и не учитывали размеры нарушения почв при вывалах ослабленных пожаром деревьев. На отдельных горях разрушение почв и вынос мелкозема в результате вывала деревьев могут быть более внушительными, чем даже на сплошных вырубках.

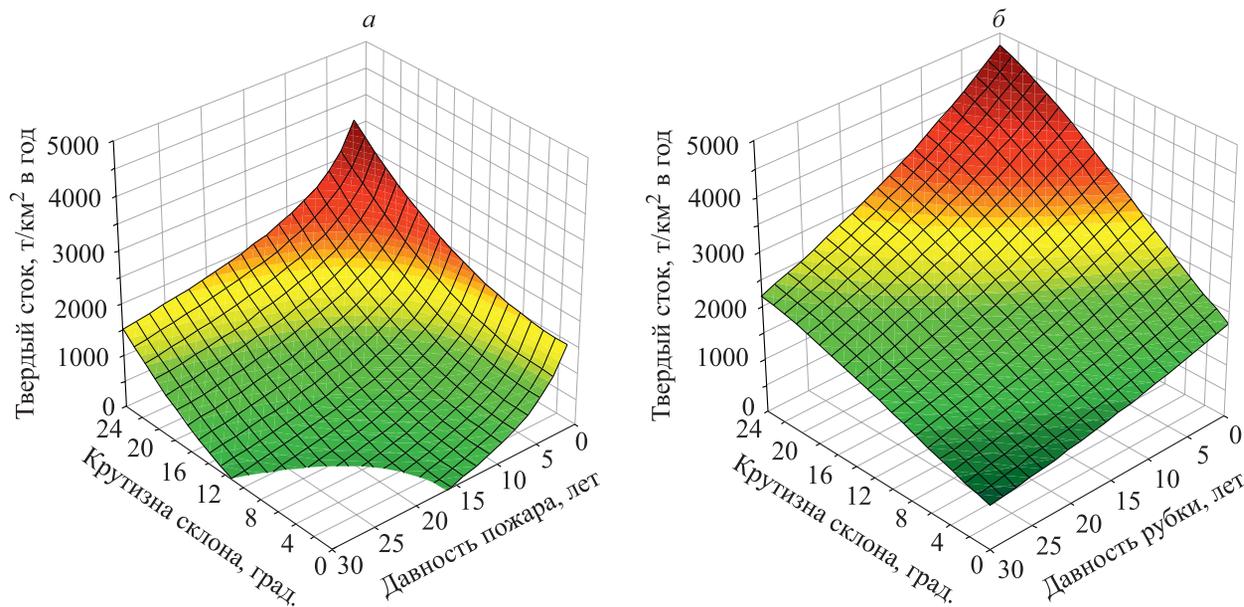


Рис. 5. Модели изменения твердого поверхностного в Прибайкалье.

Модели изменения твердого поверхностного стока. На горях: *a* — от давности пожара и крутизны склона, при годовой сумме осадков 600 мм и погибших деревьев 50 %; на сплошных вырубках: *б* — от давности рубки и крутизны склона, при эродированной ее поверхности 50 % и годовой сумме осадков 600 мм.

Кроме того, мы сравниваем интенсивность эрозии почв на вырубках и гарях в тоннах на единицу площади (км²). В то время как суммарная площадь лесных земель, пройденных пожарами в Прибайкалье, в сотни раз больше, чем площадь, пройденная рубками и, следовательно, суммарные размеры эрозии на гарях значительно выше.

В табл. 2 приведена обобщенная морфологическая характеристика пирогенно-трансформированных почв на гарях 5–8-летней давности, пройденных огнем разной интенсивности, в рассматриваемых ВПК типов леса в горном Прибайкалье.

В горно-таежном кедровом ВПК низовые пожары высокой интенсивности приводят к полному уничтожению живого напочвенного покрова и к выгоранию поверхностных органомных и грубогумусовых типодиагностических горизонтов почв. Нарушение почвозащитного растительного и органомного слоя почв на горных крутых склонах способствует интенсивному развитию плоскостного смыва мелкозема. Это приводит к изменению направления и темпов почвообразования в иных условиях развития геохимических и биогеохимических процессов.

На крутых склонах в случае полного уничтожения верхней части почвенного профиля до срединного горизонта ВНФ почвообразование начинается заново. Вновь образующийся поверхностный органомный грубогумусовый горизонт формируется на остаточном минеральном горизонте старой почвы, который для новой служит почвообразующей породой.

Таблица 2

Морфологическая характеристика пирогенно-трансформированных почв на гарях 5–8-летнего возраста

Интенсивность пожара	Морфологический профиль почв	Органогенные и органомные пирогенные горизонты			
		мощность, см		запас, т/га (абс. сух. вес)	
		$M \pm m$	$Kv, \%$	$M \pm m$	$Kv, \%$
Кедровники кустарничково-зеленомошные, почвы – подзолы грубогумусовые хрящевато-суглинистые ($n = 10$)					
Контроль	O–AO–E–BHF–C;	4,0 ± 0,8	22,1	24,8 ± 1,6	26,4
Слабая	OL/Opir–AO–E–BHF–C;	3,2 ± 0,4	26,5	18,9 ± 2,3	34,6
Средняя	Opir–AO–E–BHF–C;	2,1 ± 0,5	27,6	11,6 ± 3,2	36,6
Высокая	Opir–AOpir–AE–BHF–C; OL–BHF–C	1,1 ± 0,3 –	30,3 –	6,3 ± 2,2 –	49,8 –
Сосняки рододендроновые бруснично-разнотравные, почвы – серогумусовые глинисто-иллювирированные хрящевато-суглинистые и глинистые ($n = 15$)					
Контроль	O–AY–AYel–Ct–CtC–C;	2,4 ± 0,2	22,5	19,7 ± 0,9	10,4
Слабая	OL/Opir–AY–AYel–Ct–CtC–C;	2,0 ± 0,3	28,7	16,8 ± 1,2	18,9
Средняя	Opir–AY–AYel–Ct–CtC–C;	1,3 ± 0,2	34,6	8,8 ± 1,7	44,9
Высокая	AYpir–AYel–Ct–CtC–C; OL–Ct–CtC–C	0,8 ± 0,1 –	27,4 –	2,9 ± 0,4 –	30,7 –
Сосняки остепненные осочково-разнотравные, почвы – серогумусовые типичные хрящевато-суглинистые ($n = 8$)					
Контроль	O–AY–C;	1,2 ± 0,2	37,5	12,6 ± 1,2	21,1
Слабая	OL/Opir–AY–C;	0,9 ± 0,1	40,8	8,9 ± 1,4	32,7
Средняя	Opir–AY–C;	0,7 ± 0,1	51,4	6,2 ± 1,3	49,2
Высокая	AYpir–C; OL–C	– –	– –	– –	– –
Сосняки остепненные разнотравные, почвы – литоземы темногумусовые остаточного-карбонатные хрящевато-супесчаные ($n = 5$)					
Контроль	O–AUCsa–Mca;	1,5 ± 0,1	28,8	10,9 ± 0,4	17,5
Слабая	OL/Opir–AUCsa–Mca;	1,0 ± 0,1	31,6	8,4 ± 1,0	27,9
Средняя	AUCsa pir–Mca;	–	–	–	–
Высокая	OL–Mca	–	–	–	–

Примечание. M – среднее арифметическое; $\pm m$ – ошибка среднего; Kv – коэффициент вариации; n – число данных в выборке. Прочерк – не определялось.

В горно-таежном сосновом и подтаежно-лесостепном ВПК при низовых пожарах высокой интенсивности при ускоренной эрозии и полном смыве мелкозема почв со склонов новый «примитивный» почвообразовательный процесс на месте серогумусовых почв приводит к образованию на плотных породах либо слаборазвитых почв — петроземов, карбо-петроземов, либо литоземов грубогумусовых или карбо-литоземов.

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

Однако 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В горном Прибайкалье территории, пройденные низовыми пожарами, площадью в десятки тысяч гектаров представляют собой весьма разнообразную картину пирогенных трансформаций почв лесных экосистем: от слабых огневых повреждений под пологом древостоев, до сильных, полученных от интенсивного низового огня. В первые годы после пожаров высокой и средней интенсивности на пожарных участках наблюдается значительное изменение в поверхностных органогенных и грубогумусовых горизонтах почв за счет их выгорания. Образуются постпирогенные поверхностные органогенные пирогенные горизонты (O_{orig}, O_{Lorig}, A_{Oorig}), которые по комплексу физико-химических и водно-физических свойств значительно отличаются от аналогов под пологом не тронутого пожаром леса.

Низовые пожары в горах часто вызывают развитие необратимых деструктивных процессов, ведущих к разрушению почвы как природного тела. Пожары средней и высокой интенсивности при частичном или полном сгорании защитного растительного слоя способствуют резкому снижению водопоглотительной способности трансформированных лесных подстилок и водопроницаемости почв. Это создает условия для формирования жидкого поверхностного стока и усиления эрозионных процессов. Сток продуктов горения с огромной выгоревшей территории сильно осложняет и без того тревожную в настоящее время ситуацию с загрязнением прибрежных вод Байкала.

Предложенные математические модели позволяют рассчитывать допустимые показатели жидкого поверхностного стока и связанной с ним эрозии почв в зависимости от основных факторов, влияющих на развитие этих процессов. Это имеет большое значение для организации противопожарных работ на рассматриваемой территории, а также при проведении лесохозяйственных и лесовосстановительных мероприятий на горячих в зависимости от выделенных разновидностей почв и степени их пирогенной нарушенности.

Работа выполнена в рамках базового проекта «Теоретические основы сохранения экологического и ресурсного потенциала лесов Сибири в условиях возрастающего антропогенного пресса и климатических аномалий» (AAAA-A17-117101940014-9 (0356-2019-0027)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников А.П. Роль огня в формировании лесных почв // Экология. — 1976. — № 1. — С. 43–46.
2. Чевычелов А.П. Пирогенез и горно-таежное континентальное гумидное автоморфное почвообразование на Северо-Востоке Азии (на примере Южной Якутии). — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. — 34 с.
3. Горбачёв В.Н., Дмитриенко В.К., Попова Э.П., Сорокин Н.Д. Почвенно-экологические исследования в лесных биогеоценозах. — Новосибирск: Наука, 1982. — 185 с.
4. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. — М.: ГЕОС, 2020. — 336 с.
5. Тарабукина В.Г., Саввинов Д.Д. Влияние пожаров на мерзлотные почвы. — Новосибирск: Наука, 1990. — 120 с.
6. Тарасов П.А., Иванов В.А., Иванова Г.А., Краснощёкова Е.Н. Постпирогенные изменения гидротермических параметров почв среднетаежных сосняков // Почвоведение. — 2011. — № 7. — С. 795–803.
7. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Сулейманов Р.Р., Комиссаров М.А., Хабиров И.К., Сидорова Л.В., Назырова Ф.И., Простякова З.Г., Котлугалимова Э.Ю. Влияние низовых пожаров на свойства и эрозию лесных почв

- Южного Урала (Башкирский государственный природный заповедник) // Почвоведение. — 2019. — № 4. — С. 412–421.
8. **Benavides-Solorio J., MacDonald L.H.** Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plots, Colorado Front Range // Hydrological Processes. — 2001. — Vol. 15. — P. 2931–2952.
 9. **Perez-Cabello F., Cerda A., de la Riva J., Echeverria M.T., Garcia-Martin A., Ibarra P.** Micro-scale post-fire surface cover changes monitored using high spatial resolution photography in a semiarid environment: A useful tool in the study of post-fire soil erosion processes // Journ. Arid Environ. — 2012. — Vol. 76. — P. 88–96.
 10. **Стефин В.В.** Антропогенные воздействия на горно-лесные почвы. — Новосибирск: Наука, 1981. — 169 с.
 11. **Гынинова А.Б., Убугунов Л.Л., Куликов А.И., Гынинова Б.Д., Гончиков Б.М.Н., Бадмаев Н.Б., Сымпилова Д.П.** Послепожарная эволюция лесных экосистем на песчаных террасах Юго-Восточного Прибайкалья // Сиб. эколог. журн. — 2020. — Т. 27, № 1. — С. 13–25.
 12. **Шахматова Е.Ю., Убугунов Л.Л., Сымпилова Д.П.** Послепожарные трансформации в сосновых лесах Селенгинского среднегорья (Западное Забайкалье) // География и природ. ресурсы. — 2021. — № 1. — С. 65–72.
 13. **Krasnoshchekov Yu.N.** Transformation of soil-protective functions of mountain forests under the influence of forest fires in the central ecological zone of the Baikal natural territory // Geography and Natural Resources. — 2013. — Vol. 34, N 4. — P. 356–363.
 14. **Типы лесов гор Южной Сибири** / Под ред. В.Н. Смагина. — Новосибирск: Наука, 1980. — 336 с.
 15. **Программа и методика биогеоценологических исследований.** — М.: Наука, 1974. — 403 с.
 16. **Курбатский Н.П.** Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. — Красноярск: Изд-во Ин-та леса и древесины СО АН СССР, 1970. — С. 5–58.
 17. **Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.** Классификация и диагностика почв России. — Смоленск: Ойкумена, 2004. — 342 с.
 18. **Швебс Г.И.** Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 182 с.
 19. **Лебедев А.В., Горбатенко В.М., Краснощёков Ю.Н., Решеткова Н.Б., Протопопов В.В.** Средообразующая роль лесов бассейна озера Байкал. — Новосибирск: Наука, 1979. — 256 с.
 20. **Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.** Методы исследований физических свойств почв. — М.: Агропромиздат, 1986. — 416 с.
 21. **Краснощёков Ю.Н.** Почвозащитная роль горных лесов бассейна озера Байкал. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. — 224 с.
 22. **Robichaud P.R.** Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in northern Rocky Mountain forests, USA // Journ. Hydrology. — 2000. — Vol. 231/232. — P. 220–229.
 23. **Краснощёков Ю.Н., Евдокименко М.Д., Онучин А.А.** Постпирогенная дигрессия лесных экосистем в горном Прибайкалье // Сиб. лесн. журн. — 2018. — № 6. — С. 46–57.
 24. **Львовский Е.Н.** Статистические методы построения эмпирических формул. — М.: Высш. шк., 1988. — 239 с.
 25. **Краснощёков Ю.Н., Онучин А.А.** Использование метода математического моделирования при оценке эрозии почв на вырубках в горных лесах бассейна озера Байкал // География и природ. ресурсы. — 1990. — № 2. — С. 57–60.

Поступила в редакцию 01.06.2021

После доработки 30.09.2021

Принята к публикации 29.12.2021