

**ПОСТПИРОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОЧВ ОСТРОВА
БОЛЬШОЙ УШКАНИЙ И ПРОБЛЕМА ЭВТРОФИКАЦИИ
ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ**
POST-PYROGENIC PROCESSES IN SOILS OF BOL'SHOY USHKANIY
ISLAND (LAKE BAIKAL) AND THEIR POTENTIAL IMPACT ON
EUTROPHICATION OF THE COASTAL ZONE



УДК 631.44.061: 632.187(571.5): 504.45.058

DOI:10.24411/2588-0209-2020-10236

Вашукевич Надежда Викторовна, кандидат биологических наук, доцент,
Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург

Тимошкин Олег Анатольевич, доктор биологических наук, заведующий
лабораторией, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Самсонов Дмитрий Петрович, кандидат химических наук, заведующий
лабораторией, Институт проблем мониторинга, ФГБУ НПО «Тайфун»,
г. Обнинск

Куликова Наталья Николаевна, кандидат биологических наук, старший
научный сотрудник, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Куклина Светлана Леонидовна, старший преподаватель, Иркутский
государственный университет, г. Иркутск

Vashukevich N.V., nadiav@bk.ru

Timoshkin O.A., timole.turgenevo@gmail.com

Samsonov D.P., samsonov@rpatyphoon.ru

Kulikova N.N., kulikova@lin.irk.ru

Kuklina S.L. kukl_swet@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты изучения почв модельного участка в бухте Северная острова Большой Ушканий, пострадавшего от пожара 2015 г. Летом 2016 г. в прибрежной зоне бухты было обнаружено массовое цветение и береговые выбросы сине-зеленых водорослей. Изучены геохимически сопряженные разрезы почв модельной площадки (степень пожара сильная и слабая). Пожарное воздействие привело к значительным изменениям верхних (4-5 см) горизонтов почв. Выявлена склоновая миграция и 1,5–3-

кратное накопление (относительно фона) в нижней части катены органического углерода, аммонийного азота $N-NH_4$, подвижных фосфатов. Миграция по склону постпирогенного органического материала прослежена при изучении содержания полиароматических углеводородов (ПАУ). На 80–90% ПАУ представлены ретенон– маркером сжигания древесины хвойных пород. Таким образом, в бухте Северная через год после пожара выявлены процессы постпирогенной склоновой эрозии почв. Результатом является миграция биогенных элементов и аккумуляция их в зоне пляжей (включая интерстициальную воду), что может быть потенциальным фактором эвтрофикации прибрежной зоны озера Байкал.

Summary. We investigated the soils of a model site in Severnaya Bay, affected by the 2015 fire, on Bolshoi Ushkanii Island (Lake Baikal). Blue-green algae bloom in the coastal zone and its release to the shore we observed in this bay in summer 2016. To study the soils at two points of observation (a high and a low-intensity fire), the approach of geochemical conjugate sections applied. Wildfire strongly affected top soils horizons (4–5 sm), there are charred roots biomass, soot, charcoal, and structural aggregate stability is changed. Migration and accumulation of total organic carbon, $N-NH_4$, mobile phosphates, detected at the foot of the slope, which is 1,5–3 times higher than the content of these elements in unburned soil. The slope migration of pyrogenic carbon is traced studying polyaromatic hydrocarbons (PAHs). At 80–90%, PAHs are represented by a Retene – a marker of wood combustion. Post-pyrogenic slope erosion was detected a year after the fire in Severnaya Bay. Biogenic elements migration and accumulation in the beach area (including interstitial water) can have consequences as a potential factor in the eutrophication of Lake Baikal coastal zone.

Ключевые слова: пирогенные почвы, биогенные элементы, ПАУ, ретен, озеро Байкал, эвтрофикация прибрежной зоны

Keywords: pyrogenic soils, biogenic elements, PAHs, retene, Lake Baikal, coastal zone eutrophication

Введение

Байкальский бассейн резко выделяется на фоне сопредельных регионов по горимости лесов. Это связано с засушливостью климата и доминированием в лесных массивах пожароопасных типов светлохвойных насаждений. Лесопирогенные аномалии отмечались в 2000, 2003 и 2015 гг., а до этого случались и раньше, в середине 1950-х и во второй половине 1970-х годов. Доля лесных пожаров, возникающих от летних гроз в отдельных малодоступных лесах бассейна Байкала, по официальным данным, варьирует в пределах 5–20 % случаев [4].

Исследования по воздействию пожаров на свойства почв проводятся на протяжении нескольких десятилетий, как за рубежом, так и в различных регионах России. Результаты, приведенные в литературных обзорах [15,17,19], опубликованных рядом

авторских коллективов, позволяют очертить основной круг проблем, связанный с влиянием огня на отдельные почвенные процессы.

Результаты многолетних исследований постпирогенной трансформации почв в горном Прибайкалье представлены в работах Ю.Н. Краснощекова с соавторами [6–8]. Установлено негативное влияние пожаров на почвы различных типов лесов. Отмечено, что продукты эрозии почв с выгоревших площадей (в виде плоскостного смыва и мелкоструйчатого размыва) осложняют тревожную ситуацию с загрязнением прибрежных вод оз. Байкал.

Основные аспекты исследований пирогенного воздействия на структуру и функции водных экосистем также подробно рассмотрены в зарубежных литературных обзорах последнего времени [14, 20, 26].

В контексте нашей работы наиболее интересными представляются данные по проектам в двух регионах Канады, которые были посвящены изучению состояния нескольких десятков бореальных озер, пострадавших в результате пожаров в их водосборах. Авторы отметили, что спустя два года после пожаров в озерах более чем в 2 раза возросли средние концентрации общего фосфора, отмечены также всплески концентраций растворенного органического углерода, нитратов и аммония. Обогащение питательными веществами привело к значительному увеличению биомассы фитопланктона, которое наблюдалось в течение трех лет съемки, и было самым высоким в первые два года после пожаров [21,22].

Комплексного изучения постпирогенного состояния биогенных и абиогенных элементов прибрежных вод байкальской акватории практически не проводилось. Данные исследования представляют большой интерес для понимания факторов временной и структурной динамики экосистемы Байкала.

Архипелаг Ушканьи острова состоит из четырех островов, которые являются вершинами подводного Академического хребта, разделяющего Северную и Среднюю котловины Байкала. Геоморфологически острова представляют собой комплексы субгоризонтальных поверхностей озерных абразионных и аккумулятивных террас. Самый крупный – остров Большой Ушканий, площадью около 9 км², возвышается над урезом Байкала на 216 м. Остров имеет резко выраженную асимметрию поверхности - южный и юго-восточный склоны обрывистые, западный и северный – пологие [3,9]. Изолированность местоположения, особенности строения, своеобразие климата сформировали специфические черты природы островов. Архипелаг является очагом местного видообразования флоры и фауны [5,12] и известен, прежде всего, как месторасположение крупнейшего лежбища байкальских тюленей.

Большой Ушканий остров является уникальным примером модельной территории мониторинга наземных экосистем Прибайкалья. Постоянные пробные площади были заложены здесь В.Н. Моложниковым в 1964 и 1978 г.г. Дендрохронологическим методом была отслежена периодичность возгорания лесов. Установлено, что в 1937 г. огонь охватил весь остров, а в 1977 г. выгорела третья часть его площади. Основные постпирогенные изменения наблюдались в лиственных лесах, меньше в сосновых [10].

Детальные почвенные исследования проводились на острове М.К. Шимараевой в 1969 г. Неоднократное воздействие пожаров, привело к смене почвообразующего процесса, когда распространенные на значительной части острова дерново-подзолистые почвы до пожаров развивались по подзолисто-му типу, но постпирогенные сукцессии

растительности создали условия для развития дернового процесса. В почвах отмечены скопления углей на различных глубинах и прослойка их под лесной подстилкой [13].

В июне 2015 года на острове Большом наблюдались пожары, возгорание было вызвано сухой грозой (рис.1-п Приложения, см. цв. вкладку). Летом 2016 г. экспедицией сотрудников Лимнологического института СО РАН под руководством д.б.н. О.А. Тимошкина в прибрежной зоне бухты Северная острова было обнаружено массовое цветение и береговые выбросы сине-зеленых водорослей (способных продуцировать цианотоксины?) [27]. Гидрохимические показатели прибрежных вод оказались в норме, а пробы интерстициальной воды из лунок на пляже фиксировали повышенные концентрации биогенов (И. В. Томберг, О. А. Тимошкин, устн. сообщ.). В качестве рабочей гипотезы было выдвинуто предположение о возможном влиянии элементов-биогенов образующихся при пожаре и поступающих в зону пляжа [18] на развитие опасных для человека водорослей.

Цель настоящей работы - на основании детального исследования геохимически сопряженных разрезов почв модельного участка в бухте Северная острова Большой Ушканий оценить потенциальное влияние постпирогенной склоновой эрозии на миграцию биогенных элементов в заплесковую зону озера Байкал.

Объекты и методы

Объект исследования – почвы модельного участка, который был выбран в 2017 г. на основании маршрутных наблюдений за особенностями воздействия пожаров на экосистему бухты Северная. Участок состоит из 2 площадок – точек наблюдения (ТН1 и ТН2). Схема их расположения приведена на рисунке 1. Состояние прибрежного уреза воды в бухте, где ранее обнаружено массовое цветение и береговые выбросы сине-зеленых водорослей на момент закладки разрезов характеризует рисунок 2-п.



Рисунок 1. Схема расположения точек наблюдения 2017 г. в бухте Северная на о. Большой Ушканий

На площадках проведено морфологическое описание геохимически сопряженных почвенных разрезов (с отбором образцов на мезоморфологию, анализ физико-химических свойств, 19 проб). Из отдельных почвенных горизонтов отбирались образцы (5 проб) для определения полиароматических углеводородов (ПАУ), как характерных маркеров пирогенных процессов.

Определение физико-химических свойств почв проводилось в испытательном центре ФГБУ «Иркутская межобластная ветеринарная лаборатория» (Аттестат

аккредитации №РОСС RU.0001.21ПО90, 05.11.14 г.). Анализы выполнены согласно методикам: рН водной вытяжки – ГОСТ 26423-85; содержание органического вещества – ГОСТ 26213-91; содержание подвижных форм фосфора – ГОСТ 26209-91, аммонийного азота – ГОСТ 26489-85. Для определения полиароматических углеводов использовался метод анализа, основанный на экстракции этих соединений из пробы н-гексаном с последующей очисткой на колонках с силикагелем и хромато-масс-спектрометрической идентификации и количественном определении индивидуальных ПАУ. Анализ проводился на хромато-масс-спектрометре Agilent 7200 Q-TOF при разрешении $R > 9000$.

Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами с использованием встроенного пакета программ EXCEL.

Результаты исследований и обсуждение

Оценка процесса постпирогенной склоновой эрозии в бухте Северной на о-ве Большой Ушканий проводилась поэтапно. Одной из задач настоящей работы было подробное исследование состояния почв после пожара. Для этого свежие, ненарушенные почвенные образцы изучались под бинокляром при 20–40 кратном увеличении. Результаты мезоморфологического анализа, приведенные ниже, позволили в дальнейшем оценить динамику физико-химических показателей постпирогенных почвенных процессов. Типодиагностика почв модельного участка выполнена согласно Классификации почв России [11].

Точка наблюдения 1. Координаты $53^{\circ}51'45,4''$ с. ш. $108^{\circ}38'6,6''$ в. д. Почвенные разрезы закладывались снизу-вверх вдоль склона северной экспозиции (рис.3-п). Склон выходит на пляж, где из специальной лунки проводился отбор интерстициальных вод (рис.4-п).

Разрез 1 (рис. 5-п) заложен в нижней части склона, у подножья уступа террасы. **Тип почвы:** *Грубогумусовые, потечно-гумусовые*. АО_{orig} (0–5 см) – темно-бурый, легкосуглинистый, верхняя часть горизонта плохо перемешана, нижняя – более проработана энтомофауной, включения большого количества обугленных растительных остатков, присутствуют отмытые зерна минералов, более крупные в верхней части горизонта (рис. 6-п), имеются многочисленные включения дресвы с железистыми и карбонатными налетами, присутствует биота (коллемболы, клещи, водоросли). АО (5–20 см) – рыхлый, серовато-бурый, гумус типа моор органика плохо разложившаяся, структура мелкокомковато-порошистая, вокруг корней наблюдается вскипание от 10% HCl за счет подтягивания карбонатных растворов, многочисленная мезофауна (клещи, коллемболы, много гифов грибов), включения крупных отмытых зерен минералов (продукт дезинтеграции мраморов) и разноразмерной дресвы, на которой имеются железистые и гумусовые пленки. С_{hi} (20–50 см) – серовато-буроватый песок-супесь, с большим количеством включений галечникового материала, единичных корней, под бинокляром наблюдается прокраска гальки и минеральных зерен подвижным органическим веществом, в горизонте отмечаются осветленные пятна со следами слабого элювиирования. С_{sa} (с 50 см) – белесовато-желтый, супесчаный с большим количеством галечника разных размеров, бурное вскипание от 10% HCl.

Разрез 2 (рис. 7-п) заложен в средней части склона. **Тип почвы:** *Грубогумусовые, остаточно-карбонатные*. АО_{orig} (0–3 см) – темно-бурый, легкосуглинистый, непрочно-комковатый, большое количество обугленных растительных остатков, крупные минеральные зерна. АО (3–25 см) – серо-бурый, легкосуглинистый, мелкокомковато-

порошистый, на поверхности агрегатов выделяются минеральные зерна (слабое элювиирование), гумус грубый (типа моор), включения большого количества плохо разложившихся растительных остатков, многочисленных свежих корней, разноразмерной дресвы. Сса (25-50 см) – желтовато-серый крупный песок с крупной галькой (3–7 см), мелкозем вскипает от 10% HCl, единичные корни.

Разрез 3 (рис. 8-п) заложен в верхней части уступа террасы (у границы бровки). **Тип почвы:** *Бурозем темногумусовый, остаточно-карбонатный*. Orip (0–0,5 см) – очень маломощная из-за выгорания лесная подстилка, темно-серая, рыхлая, очень сухая, состоит из обуглившегося слаборазложившегося древесного опада, обильное включение углей, мезофауна отсутствует, переход заметный по плотности. AUrip (0,5–4 см) – темно-серый с красноватым оттенком, очень сухой, легкосуглинистый, сильно переплетен корнями трав, большое количество мелких углей, при воздействии высоких температур (прокаливании) минеральные зерна приобрели охристую окраску (рис. 9-п) и мелкокомковатая почвенная структура стала очень непрочной, мезофауна отсутствует. AU (4–10 см) – буровато-темно-серый, сухой, нижняя часть горизонта чуть более влажная, легкосуглинистый, мелкокомковато-порошистый, гумус типа модер, включения свежих и слабо обугленных растительных остатков, минеральные зерна крупнее по размеру, чем в верхних горизонтах и покрыты гумусово – железистыми и железистыми пленками, мезофауна единична. VMca (10–30 см) – желтовато-бурый, с пятнами гумусированности вокруг включений углей (следов более раннего пирогенного воздействия), среднесуглинистый, структура комковато-ореховатая, однопорядковая, зерна минералов хорошо сцеплены за счет железисто-глинистого материала, включения дресвы, единичные включения корней, слабая реакция с 10% HCl, вероятно подтяжка карбонатов из нижележащего горизонта. VMcса (30–40 см) – буровато-темно-серый с включением значительного количества окатанной гальки, единичные корни, вероятно наличие погребенного пирогенного горизонта, вскипание от 10% HCl. Cса (с 40 см) – хорошо окатанная мелкая (1–3 см) галька с серовато-желтоватым крупным песком, единичные корни, сильно реагирует с 10% HCl.

Разрез 4 заложен в небольшом понижении, в 10 м от бровки уступа береговой террасы. Повреждение древостоя среднее, стволы обгорели с одной стороны. Отмечается активное восстановление травянистой растительности на гари (рис.10-п). Нарушение почвы от пожара незначительное, слабо затронута верхняя часть лесной подстилки. В дальнейшем разрез использован для сравнения, как условно фоновый. **Тип почвы:** *Бурозем темногумусовый, остаточно-карбонатный*. Orip (0–1 см) – лесная подстилка, темно-серая, рыхлая, очень сухая, состоит из слаборазложившегося обугленного опада хвои, веток, шишек, корней, мезофауна отсутствует, переход в нижележащий горизонт заметный по плотности. AUrip (1–4 см) – темно-серый, легкосуглинистый, комковатый, обильные включения углей, дресвы с железистыми и железисто-гумусовыми пленками на поверхности, мезофауна отсутствует, вскипание локальное по многочисленным осветленным пятнам, переход заметный по цвету. AU (4–20 см) – серовато-темно-бурый, неравномерно окрашен, чередуются участки более темных и светлых оттенков, сухой, легкосуглинистый, комковато-зернистый, гумус типа модер, незначительные включения старых углей, свежих древесных корней, дресвы, мезофауна единична. VM (20–35 см) – желтовато-бурый, среднесуглинистый, структура комковато-ореховатая 2–3-х порядковая, включения дресвы, единичных корней, слабо реагирует с 10% HCl. VMcса (35–55 см) – буровато-темно-серый, среднесуглинистый, включения значительного количества

окатанной гальки и мелких угольков (свидетельствующих о предыдущих лесных пожарах), единичные корни, среднее вскипание от 10% HCl.

Точка наблюдения 2. Координаты 53°51' 49" с. ш. 108°38'12,5" в. д. Береговой уступ (терраса). Степень пожара значительно выше, чем в ТН1 (рис.11-п). Наблюдается большое количество вывалов деревьев, сгоревших муравейников и скопления валежника. Подстилка выгорела полностью, восстановление травянистого покрова минимально, на поверхности идет активное развитие мхов. На бровке уступа террасы можно наблюдать процессы размыва нарушенной поверхности и перенос по склону в зону пляжа продуктов пирогенеза и минеральной массы почвенных горизонтов (рис.12-п).

Разрез 5 (рис. 13-п) заложен на выровненном участке террасы, ближе к бровке. В дальнейшем, разрез использован для сравнения, как максимально пирогенно измененный. **Тип почвы: Серые метаморфические типичные.** АУріг (1–5 см) – буровато-серый, легкий-средний суглинок, непрочно-комковатый, основу горизонта составляет углистая пыль с золой, с налетом мелких, хорошо отмытых зерен минералов, на которой идет формирование мохового покрова, растительные остатки единичны, мезофауны нет, переход ясный по цвету. АЕЛ (5–15 см) – белесовато-светло-серый, супесчаный, комковато-порошистый, включения мелких отмытых зерен минералов, единичных растительных остатков. ВМ (15–35 см) – буровато-желтый, среднесуглинистый, структура комковато-ореховатая 2–3 порядковая, зерна минералов хорошо сцеплены за счет железисто-глинистого материала, включения дресвы, единичных корней, слабо реагирует с 10% HCl. ВМСса (ниже 35 см) – буровато-темно-серый со включением значительного количества окатанной гальки и мелких угольков, единичных корней, вероятно, наличие поребленного пирогенного горизонта, среднее вскипание от 10% HCl.

Поскольку количественная оценка биогенных элементов (С, N–NH₄, P–P₂O₅) в пирогенных почвах с точки зрения их нормирования по эвтрофикации водоемов достаточно проблематична, нами предпринята попытка сравнить их содержание в разрезах 1- 3 ТН1 и 5 ТН2 с условно фоновой почвой разреза 4 ТН1, которая подверглась минимальному воздействию пожара.

Найти аналог почвам сгоревшего участка было сложно, поскольку последний пожар 2015 г. имел значительное распространение по острову. Для оценки корректности использования почвы разреза 4 (бурозем темногумусовый) в качестве условно фоновой, нами были использованы данные по содержанию органического углерода (С_{орг.}) в гумусовых горизонтах дерново-карбонатных выщелоченных почв (по классификации 1977 г.) из работы М. К. Шимараевой [13]. Проведено сравнение с современным содержанием органического углерода в почвах острова, подвергшихся воздействию пожаров разной интенсивности. В целом, необходимо отметить близость уровня накопления С_{орг.} (12–13%) в дерново-карбонатной выщелоченной и условно фоновой почве разреза 4. Очевидно, нахождение участка в небольшом понижении способствовало частичной сохранности лесной подстилки и нижележащего гумусового горизонта. Подобная почва, отобранная на бровке террасы (разрез 3) по мезоморфологическим исследованиям несколько более иссушена. Это может свидетельствовать о большей степени термического воздействия, и уровень накопления в ней углерода выше на 1–2% из-за наличия тонкодисперсного сажистого органического материала. Наибольшему выгоранию подверглась почва разреза 5 (ТН 2). Содержание С_{орг.} в верхнем горизонте АУріг самое низкое из всех рассмотренных почв (около 7%), а сам он по мезоморфологии охарактеризован как «пылеватая углистая субстанция с золой».

Углерод оказался наиболее показательным по миграционной способности биогенным элементом. На рисунке 2 представлено его распределение по горизонтам почв вниз по склону в ТН1.

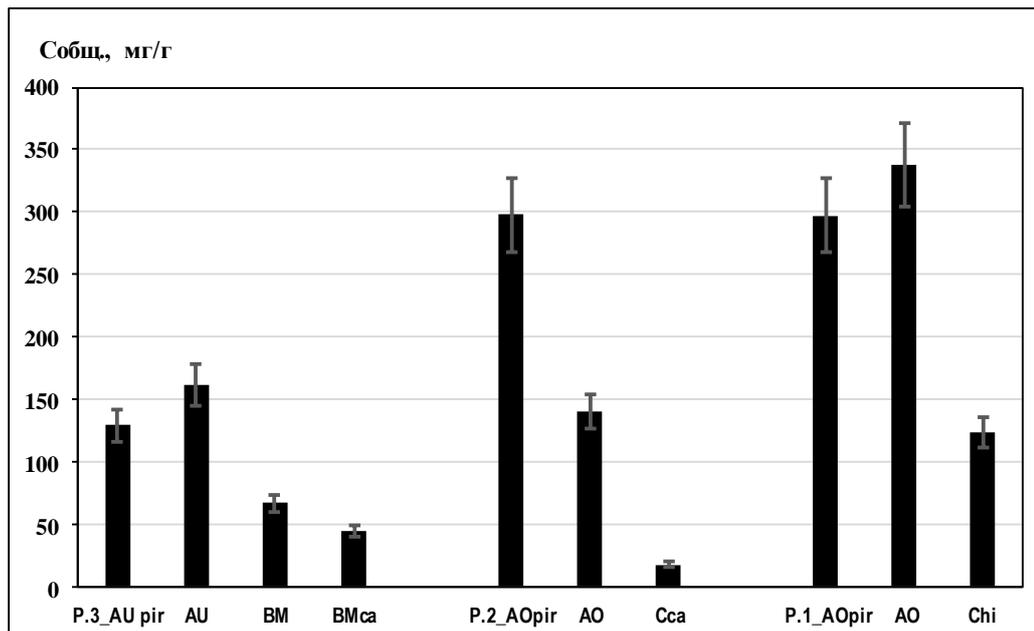


Рисунок 2. Содержание органического углерода в почвах ТН1 острова Большой Ушканий (здесь и далее: расшифровка обозначений почвенных горизонтов приведена в тексте)

Как можно видеть, в средней-нижней части склона (разрезы 2 и 1, тип грубогумусовые) наблюдается его возрастание в два раза. Причем в нижней почве сформировался даже потечно-гумусовый горизонт Chi, где содержание углерода (13-15%) сопоставимо с верхними горизонтами AU бурозема (разрез 3) на бровке склона.

Миграция по склону постпирогенного органического материала была прослежена при изучении содержания полиароматических углеводов (ПАУ) в почвах ТН1. На графиках (рис.3) представлена их сумма, а также содержание ретена (1-метил-7-изопропилфенантрен), который составляет 80–90% определенных в данных почвах ПАУ. Известно, что ретен является маркером сжигания древесины хвойных пород [23].

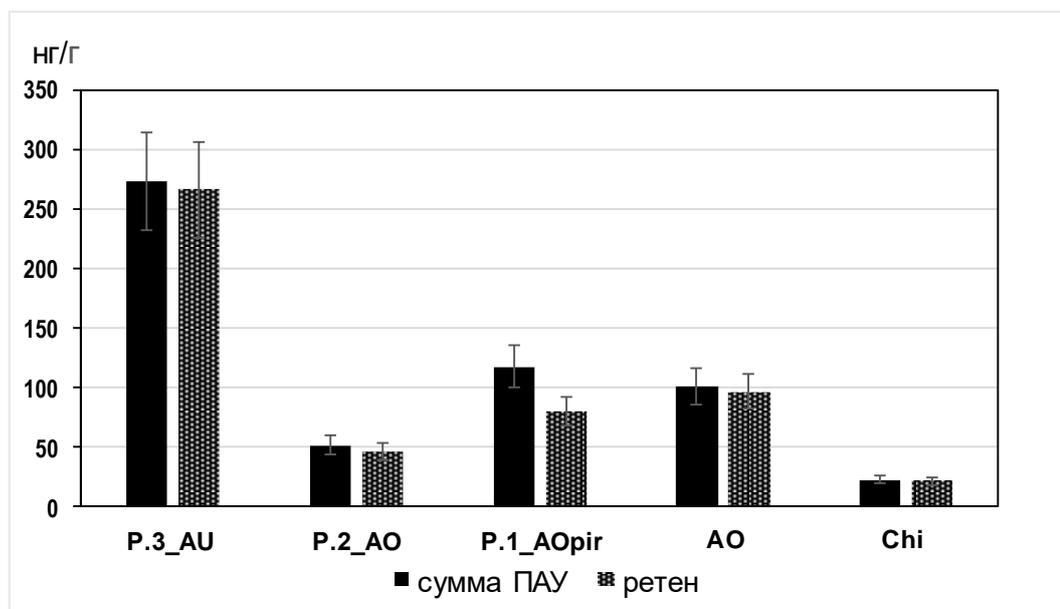


Рисунок 3. Распределение суммы полиароматических углеводородов (ПАУ) и ретена в гумусовых горизонтах почв о. Большой Ушканий

Если в верхней части склона сумма ПАУ составила порядка 270 нг/г, то в транзитном положении разреза 2 идет активный их вынос и содержание снижается до 47 нг/г. В нижней части склона (разрез 1) за счет аккумуляции органических соединений содержание ПАУ возрастает почти в 2 раза (более 100 нг/г). Ранее отмечалась 2–9 кратное увеличение в постпирогенных почвах общего содержания ПАУ, связанное, в основном, с накоплением (образованием) легких двух- и трехъядерных ПАУ, которые могут мигрировать с вертикальными и боковыми потоками в геохимически подчиненные ландшафты. Подвижность ПАУ зависит от растворимости органического вещества, которая возрастает при более высоких значениях рН [2, 24].

Согласно литературе, две наиболее распространенные в почве формы азота аммонийный ($N-NH_4$) и нитратный ($N-NO_3$) активно подвержены воздействию огня. При сжигании происходит быстрое окисление почвенного органического вещества и органический азот ($N_{орг}$) улетучивается, тем самым высвобождая $N-NH_4$. Часть аммонийного азота способна концентрироваться на минеральной матрице почвы. Зола, образующаяся при пожаре, также может содержать существенные количества $N-NH_4$ [16]. На основании метаанализа данных 87 исследований, опубликованных на протяжении 1955-1999 гг., была проведена количественная оценка воздействия лесных пожаров на аммиачный азот в почвах. Было выявлено, что пул NH_4^+ увеличивается сразу после пожара примерно в два раза, а затем постепенно уменьшается в течение года до предпожарного уровня [28]. Ранее также отмечалось, что содержание аммонийного азота обычно было выше под слоем прогретой, но не прогоревшей лесной подстилки. В целом, чем сильнее было воздействие огня, т. е. чем значительнее прогревалась почва, тем выше в ней становилось содержание $N-NH_4$ [1].

Все вышеизложенные закономерности прослеживаются при рассмотрении графиков распределения аммонийного азота в изученных почвах (рис. 4).

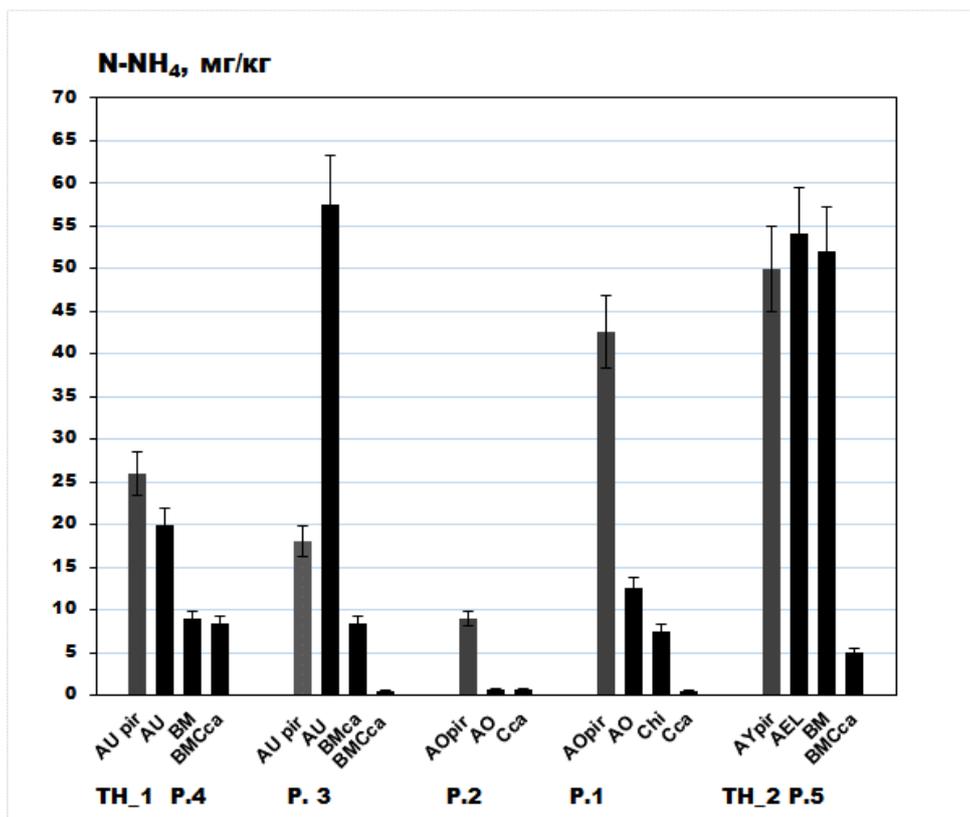


Рисунок 4. Содержание аммонийного азота в почвах о. Большой Ушканий, мг/кг

Максимальное содержание $N-NH_4$ (55–57 мг/кг) превышает уровень для условно фоновой почвы разреза 4 примерно в 2 раза. Оно выявлено в разрезе 5 TH2, где пожар имел наибольшую интенсивность, а также в гумусовом горизонте разреза 3, где, как ранее было отмечено, наблюдается некоторое иссушение минеральной массы и уровень воздействия пожара средний-низкий. Прослеживается также и склоновая миграция аммонийного азота (разрезы 3–1), где накопление его в аккумулятивной позиции лишь на 10 мг/кг ниже максимальных значений. Если проводить экстраполяцию на год назад, используя рассмотренные выше литературные данные, то средний уровень содержания $N-NH_4$ мог составлять порядка 100–120 мг/кг.

Подвижность третьего биогенного элемента фосфора (рис.5) в значительной степени связана с актуальной кислотностью почв, которая в основном находится в нейтральной и слабощелочной градации.

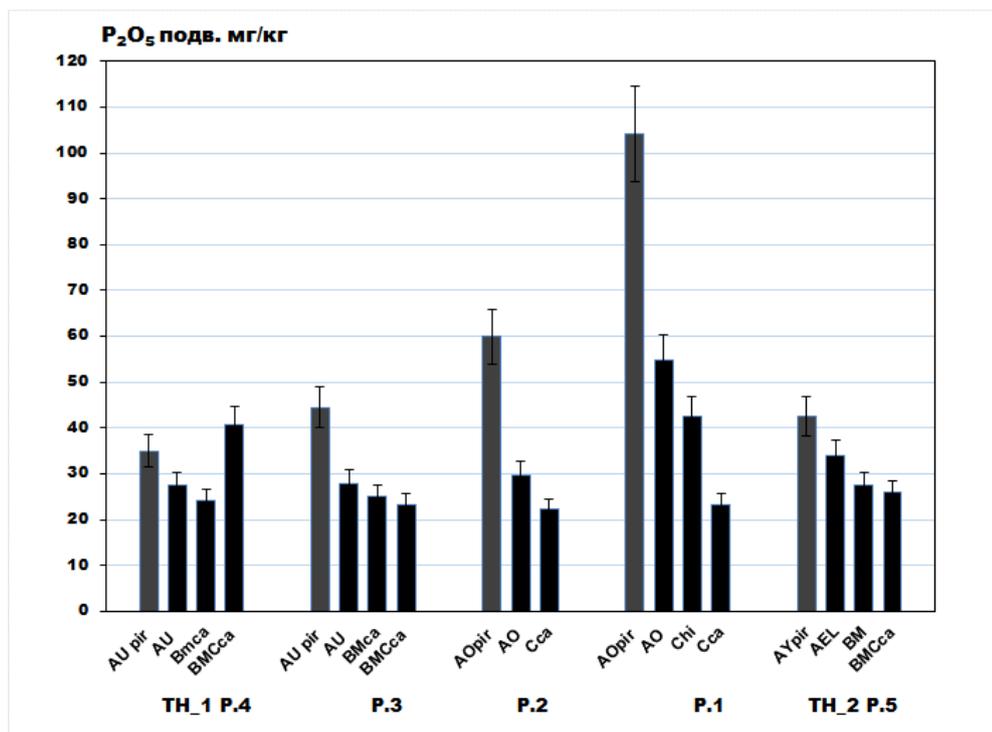


Рисунок 5. Содержание подвижного фосфора в почвах о. Большой Ушканий, мг/кг

В целом, все пирогенные горизонты имеют повышенный выход подвижных фосфатов, что связано с золой, имеющей высокую щелочность. Максимальное их содержание вновь приурочено к аккумулятивной части катены TH1 (104 мг/кг), что значительно превышает аналогичные показатели в горизонте AU фоновой почвы разреза 4.

Заключение

После пожаров высокой интенсивности на поверхности почв образуется так называемый «черный» или пирогенный углерод. Это – мелкоразмерные продукты горения (угольная пыль, сажа), индивидуальные органические соединения, сформированные в ходе пожара и способные к водной миграции. Было выявлено, что пирогенный углерод более эрозионно-подвижен, чем непирогенный. Коэффициент обогащения эродированных осадков относительно исходных почв по пирогенному углероду равен 2,3 [25].

Примерно в этих же пределах (в 1,5–2 раза) идет накопление в нижней части склона TH1 элементов-биогенов (С, N, P). Все это дает возможность говорить о связи повышенных концентраций биогенов в интерстициальной зоне Северной бухты о-ва Большой Ушканий и пожаров 2015 года. Следовательно, миграция биогенов из почв сгоревших прибрежных лесов, и их аккумуляция в зоне пляжей (включая интерстициальную воду) является потенциальным фактором, способствующим эвтрофикации прибрежной зоны озера Байкал.

Благодарности. Коллектив авторов выражает сердечную благодарность команде НИС «В.А. Коптюг» за всестороннюю помощь в проведении работ и техническое содействие при отборе проб, М.В. Левашевой за проделанную организационную работу, А.Г. Лухневу за участие в закладке почвенных разрезов.

Особая благодарность Е. Якушиной (Worley Parsons Ltd., Canada) за частичное финансирование анализов почв.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ЛИН СО РАН № 0345-2019-0009 (АААА-А16-116122110067-8) «Крупномасштабные изменения в экологии и биоразнообразии сообществ прибрежной зоны озера Байкал: междисциплинарное исследование, выявление причин, прогноз развития» (рук. О.А. Тимошкин).

Литература

1. Арефьева З. Н., Колесников Б. П. Динамика аммиачного азота в лесных почвах Зауралья при высоких и низких температурах // Почвоведение. 1963. № 3. С. 30–45.
2. Дымов А.А., Дубровский Ю.А., Габов Д.Н., Жангуров Е.В., Низовцев Н.А. Влияние пожара в северотаежном ельнике на органическое вещество почвы // Лесоведение. 2015. № 1. С. 54–81.
3. Ефимова И.М, Зуев Ф.Л. Особенности механизма образования Байкальских террас по результатам изучения террасового комплекса Ушканьих островов // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике. 2016. С. 218–220.
4. Иванов В.В., Евдокименко М.Д. Роль рубок и пожаров в динамике лесов бассейна озера Байкал // Лесоведение. 2017. № 4. С. 256–269.
5. Кожов М.М. Биология озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 315 с.
6. Краснощеков Ю.Н., Чередникова Ю.С. Постпирогенная трансформация почв кедровых лесов в южном Прибайкалье // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1057–1067.
7. Краснощеков Ю.Н. Влияние пирогенного фактора на серогумусовые почвы сосновых лесов в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории // Сибирский лесной журнал. 2014. № 2. С. 43–52.
8. Краснощеков Ю.Н., Евдокименко М.Д., Онучин А.А. Постпирогенная дигрессия лесных экосистем в горном Прибайкалье // Сибирский лесной журнал. 2018. № 6. С. 46–57.
9. Ламакин В.В. Ушканьи острова и проблема происхождения Байкала. М.: Географгиз, 1952. 189 с.
10. Моложников В.Н. Экологические реперы Прибайкалья – полигоны для комплексного мониторинга экосистем // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. 2014. № 3. С. 350–357.
11. Полевой определитель почв. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
12. Тимошкин О.А. Озеро Байкал: разнообразие фауны, проблемы ее несмешиваемости и происхождения, экология и «экзотические» сообщества // Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна в 2 томах. Сер. «Справочники и определители по фауне и флоре озера Байкал» Российская академия наук, Сибирское отделение; Лимнологический институт, Институт общей и экспериментальной биологии. Новосибирск, 2001. С. 14–72.
13. Шимараева М.К. Почвы Большого Ушканьего острова // Природа Ушканьих островов на Байкале: геоботанические исследования на побережье оз. Байкал. М.: Наука, 1969. С. 54–81.
14. Vixby R.J., Cooper S.D., Gresswell R. E., Brown L. E., Dahm C.N., Dwire K.A. Fire effects on aquatic ecosystems: an assessment of the current state of the science // Freshwater Science. 2015. V. 34(4). P. 1340–1350.

15. Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review // *Oecologia*. 1999. V.143. P. 1–10.
16. De Bano L.F., Neary D.G., Ffolliott P.F. *Fire's Effects on Ecosystems*. New York.: John Willey and Sons Inc., 1998
17. Dymov A.A., Abakumov E.V., Bezkorovaynaya I.N., Prokushkin A.S., Kuzyakov Ya.V., Milanovsky E.Yu. Impact of forest fire on soil properties (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No 4. P. 13–23.
18. Kulikova N.N., Chebykin E.P., Sutturin A.N., Vashukevich N.V., Timoshkin O.A. Impact of the coastal taiga fires onto chemical elemental composition of soils, grounds and near-shore waters of Bol'shoy Ushkaniy Island (Lake Baikal, Siberia) // *Limnology and Freshwater Biology*. 2020. No 4. P. 671–672 <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-671>
19. Mataix-Solera J., Cerda A., Arcenequi V., Jordan A., Zavala L.M. Fire effects on soil aggregation: A review // *Earth-Science reviews*. 2011. V. 109. P. 44–60
20. McCullough I.M., Cheruvilil K.S., Lapierre J-F. et al. Do lakes feel the burn? Ecological consequences of increasing exposure of lakes to fire in the continental United States // *Global Change Biology*. 2019. V. 25. P. 2841– 2854. <https://doi.org/10.1111/gcb.14732>
21. Mc Eachern P., Prepas E.E., Gibson J.J., Dinsmore W.P. Forest fire induced impacts on phosphorous, nitrogen, and chlorophyll a concentrations in boreal subarctic lakes of northern Alberta // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2000. V.57. P. 73–81.
22. Pinel-Alloul B., Planas D., Carignan R., Magnan P. Synthèse des impacts écologiques des feux et des coupes forestières sur les lacs de l'écozone boréale au Québec *Revue des sciences de l'eau* // *Journal of Water Science*. 2002. V. 15. No.1. P. 371-395.
23. Ramdahl T. Retene – a molecular marker of wood combustion in ambient air // *Nature*. 1983. V. 306. P. 580–582.
24. Rey-Salgueiro L., Martínez-Carballo E., Merino A., Vega J.A., Fonturbel M.T., Simal-Gandara J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil organic horizons depending on the soil burn severity and type of ecosystem // *Land Degradation & Development*. 2018. V. 29. P. 2112–2123.
25. Rumpel C., Chaplot V., Planchon O., Bernadou J., Valentin C., Mariotti A. Preferential erosion of black carbon on steep slopes with slash and burn agriculture // *Catena*. 2006. V. 65. P. 30–40.
26. Smith H.G., Sheridan G.J., Lane P.N., Nyman P., Haydon S. Wildfire effects on water quality in forest catchments: a review with implications for water supply// *Journal of Hydrology*. 2011. V. 396. P. 170–192.
27. Timoshkin O. A. A researcher from Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences reports: Baikal is evidently in danger. 52 pp. <https://irk.today/2019/12/11/uchenyj-so-ran-u-bajkala-nalico-vse-priznaki-bolezni/>
28. Wan S., Hui D., Luo Y. Fire effects on nitrogen pools and dynamics in terrestrial ecosystems: a meta-analysis // *Ecological Applications*. 2001. V. 11(5). P. 1349–1365.

Literatura

1. Aref'eva Z. N., Kolesnikov B. P. Dinamika ammiachnogo azota v lesnykh pochvakh Zaural'ya pri vysokikh i nizkikh temperaturakh // *Pochvovedenie*. 1963. № 3. S. 30–45.

2. Dymov A.A., Dubrovskii YU.A., Gabov D.N., Zhangurov E.V., Nizovtsev N.A. Vliyanie pozhara v severotaezhnom el'nike na organicheskoe veshchestvo pochvy //Lesovedenie. 2015. № 1. S.54–81.
3. Efimova I.M, Zuev F.L. Osobennosti mekhanizma obrazovaniya Baikal'skikh terras po rezul'tatam izucheniya terrasovogo kompleksa Ushkan'ikh ostrovov // Sovremennaya geodinamika Tsentral'noi Azii i opasnye prirodnye protsessy: rezul'taty issledovaniia na kolichestvennoi osnove. Materialy III Vserossiiskogo soveshchaniya i II Vserossiiskoi molodezhnoi shkoly po sovremennoi geodinamike. 2016. S. 218–220.
4. Ivanov V.V., Evdokimenko M.D. Rol' rubok i pozharov v dinamike lesov basseina ozera Baikal // Lesovedenie. 2017. № 4. S. 256–269.
5. Kozhov M.M. Biologiya ozera Baikal. M.: Izd-vo AN SSSR, 1962. 315 s.
6. Krasnoshchekov YU.N., Cherednikova YU.S. Postpirogennaya transformatsiya pochv kedrovyykh lesov v yuzhnom Pribaikal'e // Pochvovedenie. 2012. № 10. S. 1057–1067.
7. Krasnoshchekov YU.N. Vliyanie pirogennogo faktora na serogumusovye pochvy sosnovyykh lesov v Tsentral'noi ehkologicheskoi zone Baikal'skoi prirodnoi territorii // Sibirskii lesnoi zhurnal. 2014. № 2. S. 43–52.
8. Krasnoshchekov YU.N., Evdokimenko M.D., Onuchin A.A. Postpirogennaya digressiya lesnykh ehkosistem v gornom Pribaikal'e //Sibirskii lesnoi zhurnal. 2018. № 6. S. 46–57.
9. Lamakin V.V. Ushkan'i ostrova i problema proiskhozhdeniya Baikala. M.: Geografiz, 1952. 189 s.
10. Molozhnikov V.N. Ehkologicheskie repery Pribaikal'ya – poligony dlya kompleksnogo monitoringa ehkosistem //Razvitie zhizni v protsesse abioticheskikh izmenenii na Zemle . 2014. № 3. S. 350–357.
11. Polevoi opredelitel' pochv. M.: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2008. 182 s.
12. Timoshkin O.A. Ozero Baikal: raznoobrazie fauny, problemy ee nesmeshivaemosti i proiskhozhdeniya, ehkologiya i «ehkzoticheskiE» soobshchestva //Annotirovannyi spisok fauny ozera Baikal i ego vodosbornogo basseina v 2 tomakh. Ser. «Spravochniki i opredeliteli po faune i flore ozera Baikal» Rossiiskaya akademiya nauk, Sibirskoe otdelenie; Limnologicheskii institut, Institut obshchei i ehksperimental'noi biologii. Novosibirsk, 2001. S. 14–72.
13. Shimaraeva M.K. Pochvy Bol'shogo Ushkan'ego ostrova // Priroda Ushkan'ikh ostrovov na Baikale: geobotanicheskie issledovaniya na poberezh'e oz. Baikal. M.: Nauka, 1969. S.54–81.
14. Bixby R.J., Cooper S.D., Gresswell R. E., Brown L. E., Dahm C.N., Dwire K.A. Fire effects on aquatic ecosystems: an assessment of the current state of the science //Freshwater Science. 2015. V. 34(4). P. 1340–1350.
15. Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review //Oecologia. 1999. V.143. P. 1–10.
16. De Bano L.F., Neary D.G., Ffolliott P.F. Fire's Effects on Ecosystems. New York.: John Willey and Sons Inc., 1998
17. Dymov A.A., Abakumov E.V., Bezkorovaynaya I.N., Prokushkin A.S., Kuzyakov Ya.V., Milanovsky E.Yu. Impact of forest fire on soil properties (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No 4. P. 13–23.
18. Kulikova N.N., Chebykin E.P. , Suturin A.N. , Vashukevich N.V. , Timoshkin O.A. Impact of the coastal taiga fires onto chemical elemental composition of soils, grounds and

- near-shore waters of Bol'shoy Ushkaniy Island (Lake Baikal, Siberia) //Limnology and Freshwater Biology. 2020. No 4. P. 671–672 <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-671>
19. Mataix-Solera J., Cerda A., Arcenequi V., Jordan A., Zavala L.M. Fire effects on soil aggregation: A review //Earth-Science reviews. 2011. V. 109. R. 44–60
 20. McCullough I.M., Cheruvilil K.S., Lapierre J-F. et al. Do lakes feel the burn? Ecological consequences of increasing exposure of lakes to fire in the continental United States //Global Change Biology. 2019. V. 25. P. 2841– 2854. <https://doi.org/10.1111/gcb.14732>
 21. Mc Eachern P., Prepas E.E., Gibson J.J., Dinsmore W.P. Forest fire induced impacts on phosphorous, nitrogen, and chlorophyll a concentrations in boreal subartic lakes of northern Alberta //Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2000. V.57. P. 73–81.
 22. Pinel-Alloul B., Planas D., Carignan R., Magnan P. Synthèse des impacts écologiques des feux et des coupes forestières sur les lacs de l'ecozone boréale au Québec Revue des sciences de l'eau //Journal of Water Science. 2002. V. 15. No.1. P. 371-395.
 23. Ramdahl T. Retene – a molecular marker of wood combustion in ambient air //Nature. 1983. V. 306. P. 580–582.
 24. Rey-Salgueiro L., Martínez-Carballo E., Merino A., Vega J.A., Fonturbel M.T., Simal-Gandara J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil organic horizons depending on the soil burn severity and typo of ecosystem // Land Degradation & Development. 2018. V. 29. P. 2112–2123.
 25. Rumpel C., Chaplot V., Planchon O., Bernadou J., Valentin C., Mariotti A. Preferential erosion of black carbon on steep slopes with slash and burn agriculture // Satena. 2006. V. 65. P. 30–40.
 26. Smith H.G., Sheridan G.J., Lane P.N., Nyman P., Haydon S. Wildfire effects on water quality in forest catchments: a review with implications for water supply// Journal of Hydrology. 2011. V. 396. P. 170–192.
 27. Timoshkin O. A. A researcher from Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences reports: Baikal is evidently in danger. 52 pp. <https://irk.today/2019/12/11/uchenyj-so-ran-u-bajkala-nalico-vse-priznaki-bolezni/>
 28. Wan S., Hui D., Luo Y. Fire effects on nitrogen pools and dynamics in terrestrial ecosystems: a meta-analysis // Ecological Applications. 2001. V. 11(5). P. 1349–1365.

Приложение



Рис. 1-п. Шлейф дыма от пожара на о. Большом Ушканьем.
(Снимок Aqua MODIS от 16 июня 2015 г.)

Fig. 1-p. Plume of smoke from a fire on Bolshoi Ushkaniy Island .(Aqua MODIS snapshot June 16, 2015)
[Internet resource]
<http://www.forestforum.ru/viewtopic.php?f=24&t=18119>
(Accessed: 16.08.2019).



Рис. П-2. Состояние прибрежного уреза воды в бухте Северной на момент закладки разрезов, 2017 г.
Fig. 2-p. The state of the coastal water edge in Severnaya Bay at the time of soil sampling, 2017

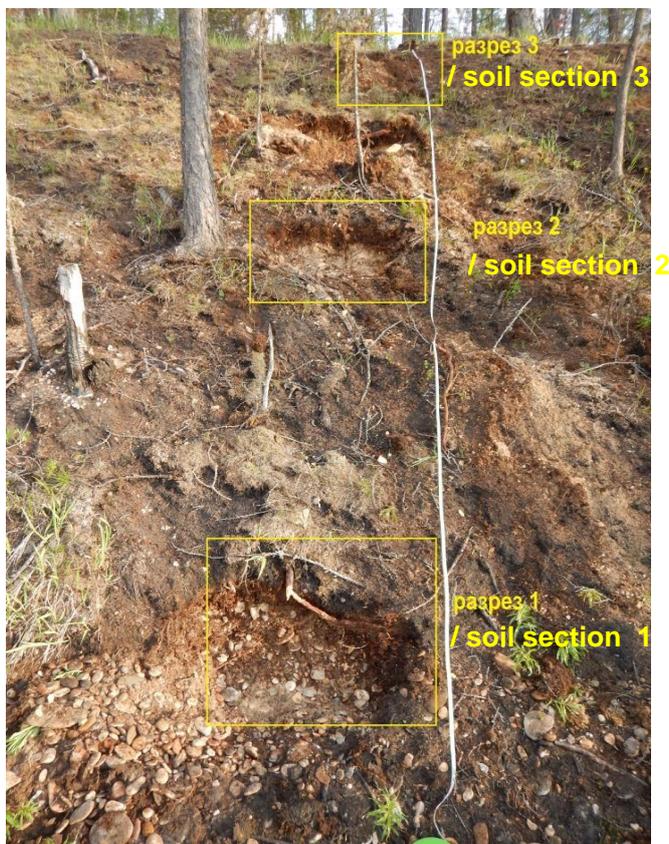


Рис. 3-п. Общий вид почвенной катены (точка наблюдения, ТН 1)

Fig. 3 p. General view of the soil catena (observation point, PO 1)



Рис. 4-п Лунка с интерстициальными водами на пляже в (точке наблюдения, ТН1)

Fig. 4-p Hole with interstitial waters on the beach (observation point, PO1)

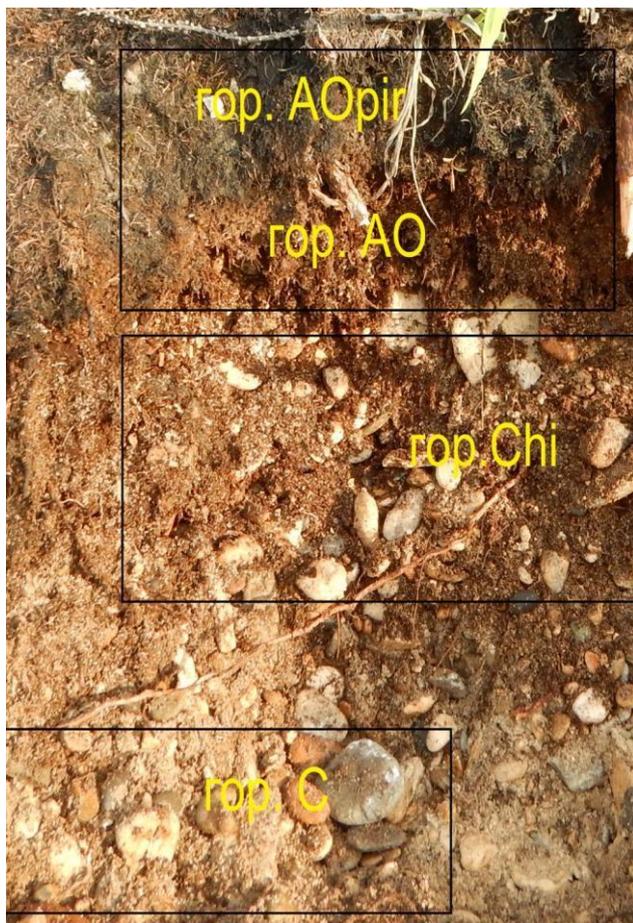


Рис. 5-п. Почвенный профиль разреза 1
Fig. 5-p. Profile of soil section 1

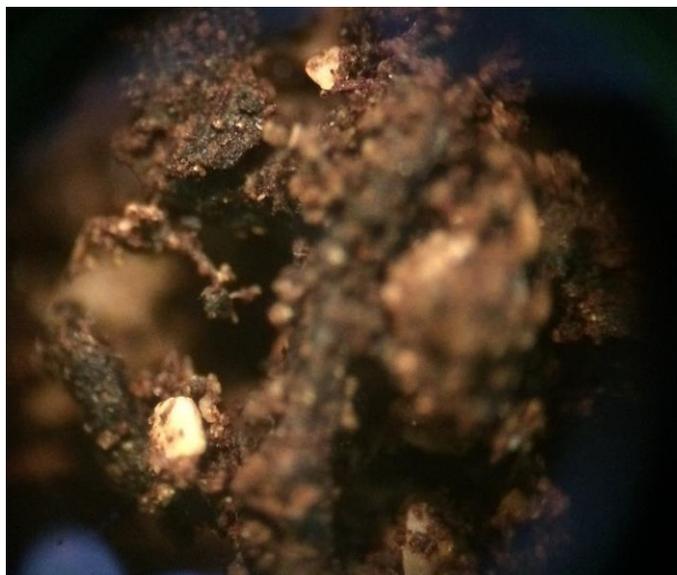


Рис. 6-п. Мезоморфология горизонта AOpir разреза 1
Обугленные растительные остатки и зерна минералов
Fig. 6 p. Mesomorphology of the horizon AOpir, soil section 1
Carbonized plant debris and mineral grains

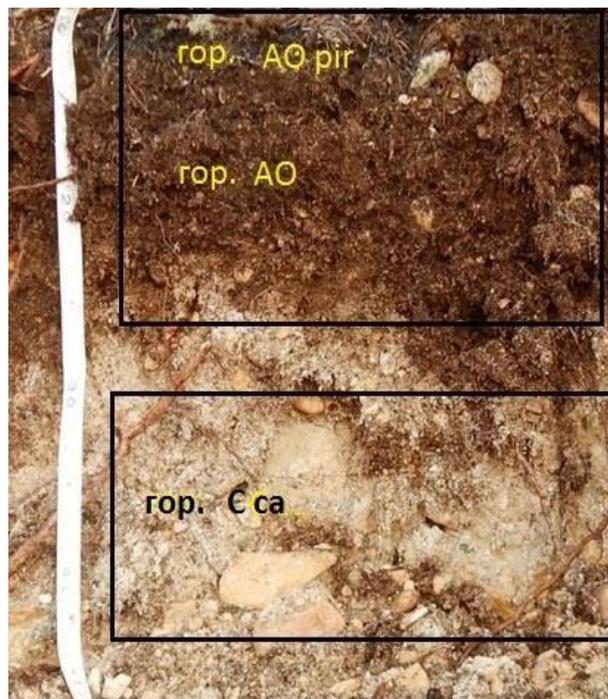


Рис. 7-п. Почвенный профиль разреза 2
Fig. 7-p. Profile of soil section 2



Рис. 8-п. Почвенный профиль разреза 3
Fig. 8-p. Profile of soil section 3



Рис. 9-п. Мезоморфология горизонта AUpir разреза 3 Бурая окраска минеральной массы от сильного нагрева при пожаре

Fig. 9-p. Mesomorphology of the horizon AUpir, soil section 3 Brown color of the mineral mass from strong heating in case of fire



Рис. 10-п. Состояние древостоя и травянистого покрова на месте закладки разреза 4
Fig. 10-p. The post-fire condition of the wood and grass cover at the site of soil section 4

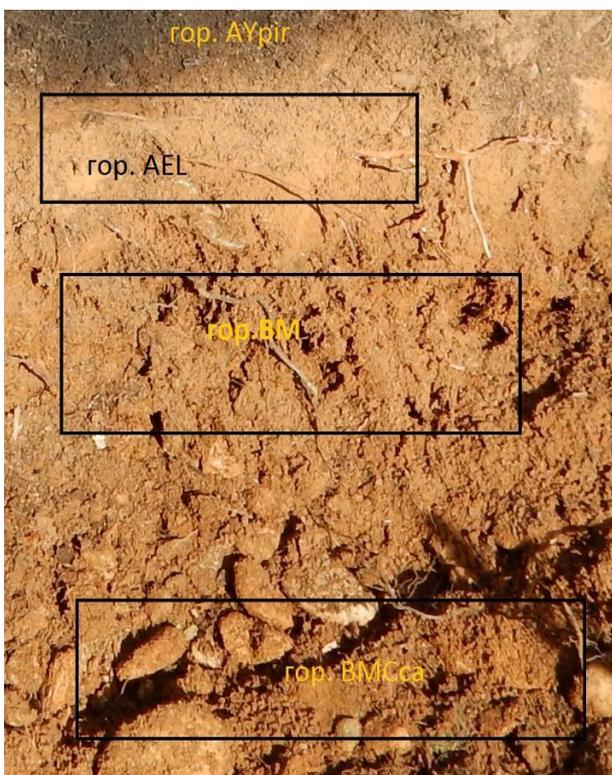


Рис. 13-п. Почвенный профиль разреза 5
Fig. 13-p. Profile of soil section 5



Рис. 11-п. Состояние участка и поверхности почвы на месте закладки разреза 5, (точка наблюдения, ТН 2)
Fig. 11-p. The local condition and soil surface at the site of soil section 5 (observation point, PO 2).



Рис. 12-п. Участок размыва нарушенной поверхности на бровке склона в ТН 2 Стрелками указаны зоны переноса и накопления на пляже у подножья склона продуктов пирогенеза и минеральной массы горизонтов почв
Fig. 12-p. The erosion area of the disturbed surface on the edge of the slope in (observation point PO 2). The arrows indicate the transport and accumulation zones on the beach at the foot of the slope of the pyrogenesis products and the mineral mass of soil horizons