

Постпирогенные почвы лиственничных лесов Чарской котловины (Северное Забайкалье)

© 2025. Ю. К. Васильчук, д. г.-м. н., профессор, А. П. Гинзбург, м. н. с.,
А. К. Васильчук, д. г. н., в. н. с., Н. А. Буданцева, к. г. н., с. н. с.,
Дж. Ю. Васильчук, к. г. н., м. н. с.,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,
e-mail: acvasilchuk@geogr.msu.ru

С целью изучения влияния пожаров на свойства почв постпирогенных ландшафтов в межгорных котловинах северного Забайкалья изучены профили почв на первой голоценовой террасе реки Чары в месте впадения в неё ручья Беленького (Забайкальский край, Россия). Почвы подверглись воздействию двух лесных пожаров в 1994 и 2019 гг. Исследованные почвы были классифицированы как глеезёмы, подтипа мерзлотные (Cryosols Glacic). Во всех почвах выявлены признаки пирогенеза. Значения $pH_{\text{вод}}$ почв варьируют в диапазоне от 3,9 до 5,1, pH_{KCl} – от 3,5 до 4,9, гидролитической кислотности – от 3,3 до 4,5 ммоль(экв)/100 г. Установлено, что пирогенный процесс не оказывает существенного влияния на кислотность почвы. Общее содержание органического углерода, достигающее в постпирогенных горизонтах почв 8,7%, увеличивается в результате выгорания растительного покрова и органогенного горизонта почвы. Почвы характеризуются высоким содержанием частиц с диаметром от 0,01 до 0,25 мм (более 35%), при этом постпирогенные горизонты обеднены тонкими фракциями (<0,01 мм). Явным признаком прошедшего пожара является вынос из почв Si, Al, Sr, Zr и Rb. Коэффициенты радиальной дифференциации макроэлементов в профилях почв имеют значения 0,5–0,7 (Al) и 0,7–0,9 (Si). Для макроэлементов в составе недавно выгоревших горизонтов характерен вынос ($R_{\text{Sr}}=0,2$, $R_{\text{Zr}}=0,2$, $R_{\text{Rb}}=0,8$), а в более старом постпирогенном горизонте, наоборот, наблюдается сильное накопление этих макроэлементов: $R_{\text{Sr}}=4,0$, $R_{\text{Zr}}=7,7$, $R_{\text{Rb}}=3,1$. Полученные данные помогут установить влияние пирогенного фактора на физико-химические свойства почв, подвергшихся выгоранию.

Ключевые слова: физико-химические свойства почв, лесные пожары, пост-пирогенная трансформация, профильные распределения.

Post-pyrogenic soils of the Chara Depression larch forests (North Transbaikalia)

© 2025. Yu. K. Vasil'chuk ORCID: 0000-0001-5847-5568*
A. P. Ginzburg ORCID: 0000-0002-7879-5419*, A. C. Vasil'chuk ORCID: 0000-0003-1921-030X*
N. A. Budantseva ORCID: 0000-0003-4292-5709*, J. Yu. Vasil'chuk ORCID: 0000-0002-4855-8316*
Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie gory St., Moscow, Russia, 119991,
e-mail: acvasilchuk@geogr.msu.ru

We looked at the soil profiles on the first Holocene terrace of the Chara River, where the Belen'kiy stream flows into it (Transbaikalia, Russia), to find out how wildfires change the post-pyrogenic soil properties in the intermontane depressions of North Transbaikalia. In 1994 and 2019 forest fires affected the soil. Studied soils were classified as gleysols of the permafrost subtype (Cryosols Reductaquic Pyric). All soils showed signs of pyrogenesis. Values of pH_{water} varied within the range of 3.9–5.1, pH_{KCl} – varied from 3.5 to 4.9, and hydrolytic acidity varied from 3.3 to 4.5 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$. Thus, the pyrogenic process did not impact the soil solution pH significantly. Total organic carbon content, which reached 8.7% in post-pyrogenic soil horizons, probably increased as a result of vegetation combustion. Soils have a lot of particles with sizes between 0.01% and 0.025 mm (more than 35%), and after the fire, the post-pyrogenic horizons lose most of the fine particles (<0.01 mm). The leaching of Si, Al, Sr, Zr, and Rb is an explicit indication of wildfire transformation. The radial differentiation coefficients of macroelements were 0.5–0.7 (Al) and 0.7–0.9 (Si) in the soil profiles. Recently burnt soil horizons were characterized by the depletion of trace elements ($R_{\text{Sr}}=0.2$, $R_{\text{Zr}}=0.2$, $R_{\text{Rb}}=0.8$), however in the older post-pyrogenic horizon, oppositely, the strong accumulation of these trace elements was observed: $R_{\text{Sr}}=4.0$, $R_{\text{Zr}}=7.7$, $R_{\text{Rb}}=3.1$. These data will aid in determining the influence of pyrogenic factors on the physical and chemical characteristics of soils exposed to combustion.

Keywords: physical and chemical soils properties, forest fires, post pyrogenic transformation, profile distributions.

Одним из экологических последствий природных пожаров в Сибири, где расположена большая часть лесов и болот России [1–5], является загрязнение атмосферы. Горение биомассы активизирует эмиссию продуктов горения и парниковых газов в атмосферу [6–10]. Пожары в зоне развития многолетнемерзлых пород воздействуют на окружающую среду как импульсный триггер, который мобилизует углерод за счёт сжигания растительности и поверхностных органических слоёв почвы. В некоторых случаях, дополнительное высвобождение углерода происходит за счёт протаивания многолетнемерзлых пород [9]. Увеличение числа пожаров в криолитозоне оказывает существенное влияние на растительность, круговорот углерода и питательных веществ, а также стабильность рельефа [10, 11]. Увеличение интенсивности и частоты пожаров способствует развитию альтернативных сукцессий и переходу от хвойных лесов к лиственным, которые характеризуются значительными различиями в накоплении и круговороте углерода и азота по сравнению с хвойными лесами [12]. Лесные пожары изменяют морфологическое строение мерзлотных почв: формируется пирогенный слой, проявляются пиро- и криотурбации, изменяется глубина протаивания и водный режим мерзлотных почв [13]. Проявление глобальных изменений в условиях повышенной континентальности климата в Прибайкальском регионе сопровождается увеличением площадей лесных пожаров и опасностью невозврата постпирогенных экосистем в лесные [14, 15]. Воздействие природных пожаров на почвы представляется важным фактором почво-образования, формирующим специфические полициклические постпирогенные почвы [16] и постпирогенные признаки горизонтов почв, содержащих обугленные растительные остатки. При этом угольки прослеживаются на микро- и субмикроморфологическом уровнях. Почвы с полициклическим профилем, содержащие, помимо современного, ещё несколько погребённых гумусовых горизонтов с обильным включением чёрных древесных углей формируются в трансаккумулятивных фациях ландшафтов в ландшафтно-климатических условиях Центральной и Южной Якутии, а также Забайкалья [16].

Поскольку отсутствует единая точка зрения на оценку влияния пожаров на изменение почвенного покрова в современной классификации почв России, нет оснований для отнесения почв ствола постпирогенных

к подтипу постпирогенных, поскольку этот подтип выделен только для отдела торфяных ствола органогенных почв [17]. Постпирогенные почвы не адекватно отражены в современных классификациях, несмотря на значительную роль пожаров в их развитии, хотя многие исследователи [14–24] в своих работах отмечают, что в формировании постпирогенных почв роль пожаров весьма и весьма значительная. Сложность выделения пирогенных таксонов состоит в отсутствии единой точки зрения на оценку влияния пожаров на изменение почвенного функционирования. Поскольку пирогенные морфологические признаки в почвах сохраняются до 150 лет, и отражают развитие почв, было предложено выделение универсального подтипа «пирогенный» (pir) [18–25].

Индекс «pir» и термин «постпирогенный» используются в данной работе применительно к глеезёмам, чтобы выделить причину изучаемой трансформации свойств почв и самовосстановления их свойств. Наиболее часто при изучении постпирогенной динамики почвенных свойств исследуются почвы гарей разных возрастов и фоновые участки, на которых пожаров не было [14, 22–25]. Предметом изучения является динамика содержания органического углерода, азота, изменения гранулометрического состава кислотности почв после пожаров [14, 16, 18, 19].

Целью работы было изучение постпирогенных почв Чарской котловины, пройденных низовыми пожарами разной интенсивности в 1994 и 2019 гг., исследование их классификационных признаков, динамики почвенной кислотности, содержания $C_{орг}$, гранулометрического состава и радиальной дифференциации концентраций макро- и микроэлементов в профилях почв.

Объекты и методы исследования

Территория Чарской котловины располагается в Каларском районе Забайкальского края [26], рельеф её дна представляет собой широкую выровненную поверхность в долине р. Чары (рис. 1), сложенную голоценовым русловым ($Q^1_{IV} - Q^2_{IV}$) аллювием [7]. Это район резко континентального климата, среднегодовая температура воздуха $-7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднегодовое количество осадков 328 мм [27]. Многолетнемерзлые породы (ММП) характеризуются сплошным распространением по площади со средними температурами от -6 до $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [28]. Мощность сезонно-талого слоя (СТС) от 0,5

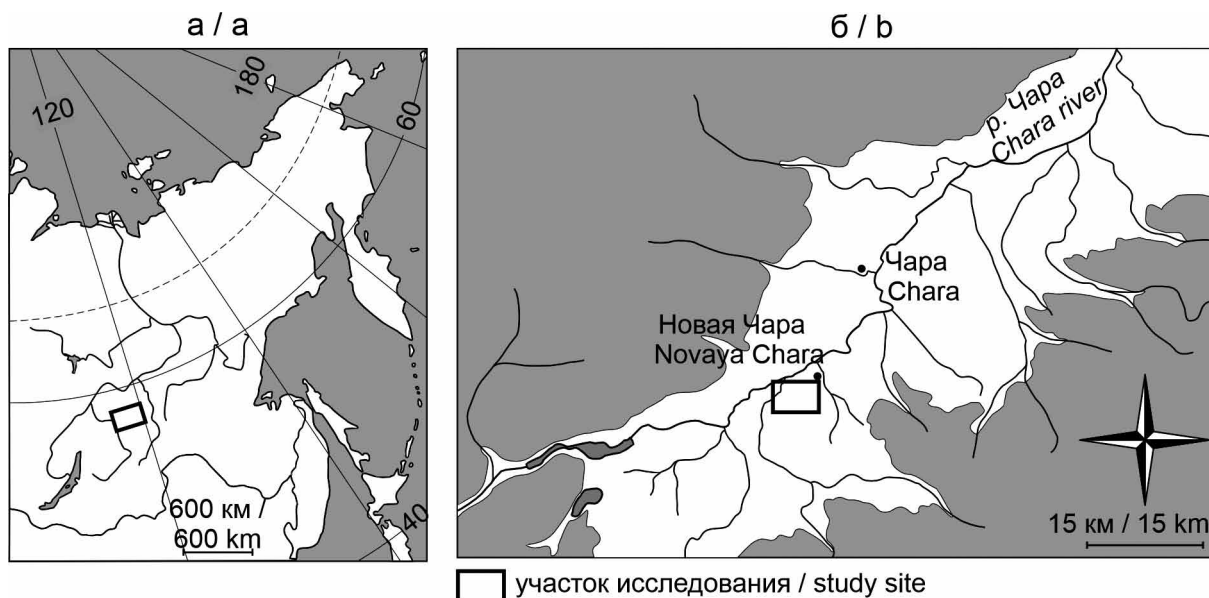


Рис. 1. Схема расположения ключевого участка исследований в пределах азиатской части России (а) и Чарской котловины (б)
Fig. 1. Schematic location of the studied key-site within the Asian part of Russia (a) and the Chara Depression (b)

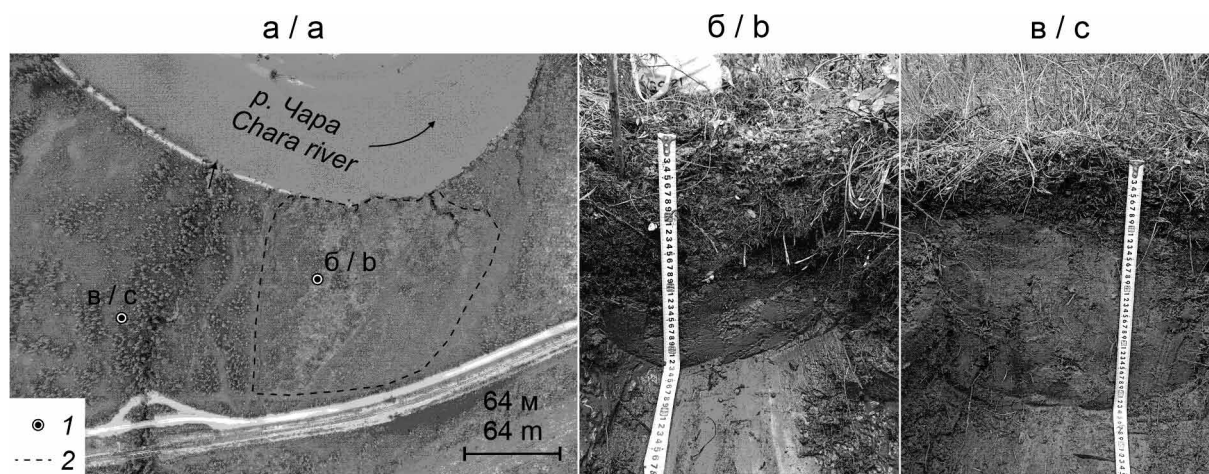


Рис. 2. Расположение почвенных разрезов на ключевом участке (а) и профили глеезёмов после пожаров возрастом 3 года (б) и 28 лет (в): 1 – местоположения заложённых почвенных разрезов; 2 – граница выгоревшей в 2019 г. площади
Fig. 2. Soil pits location scheme at the key-site (a) and gleysols profiles after 3- (b) and 28-year old (c) wildfires: 1 – studied soil pits locations; 2 – area burnt in 2019

до 0,9 м [29]. Особенностью является широкое распространение подземных льдов, например, раннеголоценовых и современных сингенетических повторно-жильных льдов [30].

Изучены физико-химические свойства постпирогенных почв в долине р. Чары (рис. 2) и их динамика через 3 и 28 лет после пожаров (рис. 3).

Почвенные разрезы были заложены в долине р. Чары на кочковатой субгоризонтальной заболоченной поверхности 7-метровой террасы, которую пересекает ручей Беленький (56°45'38,72" с. ш., 118°11'30,12" в. д.)

(рис. 2а). Разрез Ch-S-22-1 заложен на правом берегу ручья в заболоченном редкостойном постпирогенном лиственничном лесу (рис. 2б), в котором разбита площадка сети CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) [31]. Возраст гари здесь составляет 3 года. Разрез Ch-S-22-2 находится на левом берегу ручья в более густом лиственничнике без признаков заболачивания (рис. 2в). Из профилей почв по генетическим горизонтам были отобраны образцы почв. Возраст гари 28 лет.

Профили этих почв в полевых условиях были описаны и систематизированы по клас-

сификации и диагностике почв России [17] и полевому определителю почв [32], а также согласно международной классификации [33]. Пробоподготовка была выполнена в соответствии с методиками, описанными в [34]. Кислотность в водной (актуальная), хлоридно-калиевой (обменная) и ацетатно-натриевой (гидролитическая) вытяжках была определена потенциометрически водородно-селективным электродом **Mettler Toledo** [34]. **Общее содержание органического углерода** ($C_{орг.}$) в почвах определялось методом мокрого сжигания И.В. Тюрина с титриметрическим окончанием. Гранулометрический состав почв был определён на лазерном гранулометре **Fritsch Analysette 22** (Германия). Частицы физической глины (с диаметром <10 мкм) исследовались для классификации почв по системе Н.А. Качинского. Гранулометрический состав органических горизонтов определялся в содержащейся в них минеральной части. Валовой элементный состав был исследован портативным горно-геологическим рентген-флуоресцентным анализатором (РФА) **Olympus Delta Professional** (США). Контрастность профильного (радиального) распределения оценивалась по коэффициенту радиальной дифференциации R [35], который вычисляется по формуле:

$$R_x = \frac{R_{x(горизонт)}}{R_{x(порода)}},$$

где $R_{x(горизонт)}$ – содержание химического элемента x в почвенном горизонте; $R_{x(порода)}$ – его содержание в горизонте почвообразующей породы.

Статистическая обработка данных и построение графиков было осуществлено в **Microsoft Excel-2022**. **Графическое сопровождение** выполнено в векторном графическом редакторе **CorelDRAW-2022**.

Результаты и обсуждение

Описанные почвы отнесены к стволу пост-литогенного почвообразования, отделу глеевых почв, типу глеезёмов [6]. Для строения обоих профилей характерна последовательность горизонтов $O - G - CG$. На глубинах 34 и 44 см в разрезах горизонты мёрзлые (CG^{\perp}). Общим для этих почв является подтип мерзлотные [17]. Важной особенностью обоих разрезов является наличие угольков в горизонте O , что даёт основание для введения подтипа постпирогенные (O_{pir}) в их названия. Также необходимо отметить наличие горизонта G_{ox} – окисленно-глеевого, в профиле $Ch-S-22-2$. Возникает этот признак в результате понижения уровня грунтовых вод, что также косвенно свидетельствует о недавнем пожаре, в результате которого мощность $СТС$ возрастает. Поверхностные органические горизонты почв были отнесены к подстильно-торфяным (O), а не к торфяным (T) из-за низкого для горизонтов T содержания органического углерода – до 8,7%, и из-за перемешанности этих горизонтов с большим количеством минеральных частиц, что не характерно для T [17].

Влияние пирогенеза на мерзлотные почвы было подробно исследовано в работе [36]. Специфика образования пирогенно-трансформированных мерзлотных почв

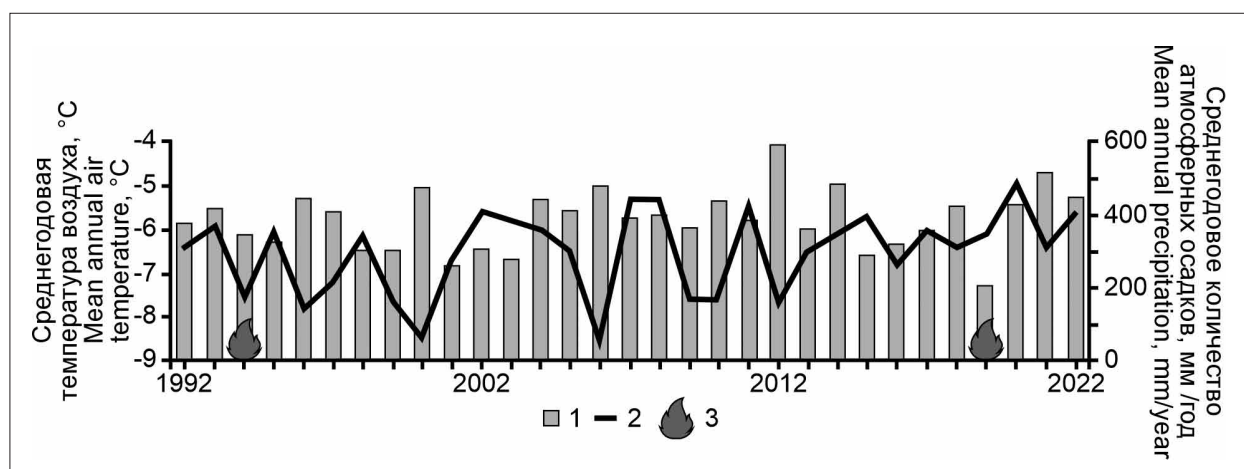


Рис. 3. Динамика климатических параметров (по данным метеорологической станции Чара) за последние 30 лет: 1 – среднегодовое количество атмосферных осадков, мм/год; 2 – среднегодовая температура воздуха, °С; 3 – годы прохождения пожаров

Fig. 3. Climate parameters dynamics (according to the data of “Chara” weather station) in the last 30 years: 1 – mean annual precipitation, mm/year; 2 – mean annual air temperature, °C; 3 – years of wildfires

в межгорных котловинах Байкальского региона была рассмотрена в работе [18]. Было установлено, что в составе пирогенных погребённых гумусовых горизонтов отмечается увеличение содержания гумуса и азота, а также фракций физической глины, ила и обменных оснований Ca^{2+} и Mg^{2+} . Профильное строение так называемых полициклических почв в трансаккумулятивных фациях ландшафтов Центральной и Южной Якутии и Забайкалья исследовано в работе [16]. Постпирогенные трансформации свойств и состава мерзлотных почв были показаны на примере изменения показателей дерново-карбонатной выщелоченной почвы в послепожарный период (1985–1992 гг.). Было установлено, что суммарное послепожарное уменьшение (на 21 см) мощности почвы обусловлено в большей мере термопросадкой (46% от общей потери мощности) почвенного мелкозёма и в меньшей мере – его поверхностным смывом (28%) и выгоранием (минерализацией) органогенной части почвенного профиля (26%) [18]. При пирогенной трансформации мерзлотных почв Центральной и Южной Якутии также наблюдалось образование почв с полициклическим профилем сложного строения, включающего в своем составе 2–3 погребённых деградированных пирогенных гумусовых горизонта с обильным включением чёрных древесных углей [18]. Следовательно, в результате пожаров происходило 2–3 цикла почвообразования. Постпирогенные прослои и горизонты таких почвенных профилей значительно отличаются от природных негоревших аналогов по морфологическому и микроморфологическому строению, элементному составу, зольности органического вещества [16]. Установлено также, что экспозиция склонов, на которых происходит пожар, влияет на морфологические и биологические свойства почв, особенно в криолитозоне [3].

Актуальная кислотность ($\text{pH}_{\text{вод.}}$) исследованных нами почв – глеезёма постпирогенного мерзлотного и глеезёма окисленно-глеевого постпирогенного мерзлотного – варьирует от 3,9 до 5,1, обменная кислотность (pH_{KCl}) – от 3,5 до 4,9, гидролитическая кислотность ($\text{H}_{\text{г}}$) – от 3,3 до 4,5 ммоль (экв)/100 г. Реакции профилей соответствуют грациям от сильнокислых (<4,5) до слабокислых (5,1–5,5). Близкие значения реакции среды почвенных профилей (от 4,0 до 6,3) описаны при изучении почв ландшафтного заказника регионального значения «Ингамакитский» [37]. Почвы межгорных котловин Забайкалья более щелочные – значе-

ния $\text{pH}_{\text{вод.}}$ находятся в интервале 5,9–7,9 [38]. Близкие к нейтральным и даже слабощелочные реакции (до 8,3) связаны с неглубоким залеганием карбонатных почвообразующих пород на горных хребтах и в котловинах [39]. В отличие от них, почвы сосновых лесов Прибайкалья на песчаных почвах имеют кислую реакцию. При этом постпирогенные горизонты почв отличаются более кислой реакцией среды, чем минеральные. Это связано с большей степенью разложения органических остатков в горизонтах **Ориг** из-за их разрушения в процессе пирогенеза. Пирогенный процесс сглаживает резкость изменения pH при переходе от верхней части профилей к нижним [15]. Аналогичные трансформации происходят и с pH_{KCl} , значения которых изменяются с 4,4–4,8 до 5,1–5,3. Гидролитическая кислотность, как отмечено в работах [15, 39], также значительно снижается с глубиной почвенного разреза.

В органогенных горизонтах почв содержится 8,7 и 6,8% $\text{C}_{\text{орг.}}$. Наблюдается резкое снижение содержания $\text{C}_{\text{орг.}}$ от верхних горизонтов к нижним, при этом содержание органического углерода в горизонтах, подвергшихся пожару в 1994 г., выше, чем в горизонтах, горевших в 2019 г. Содержание $\text{C}_{\text{орг.}}$ в альфегумусовых почвах Забайкалья варьирует в пределах 1,6–15,0% гумуса [38]. Органогенные горизонты почв содержат в 6–10 раз больше гумуса, чем минеральные [15, 39]. В более старом постпирогенном горизонте наблюдается пониженное содержание гумуса по сравнению с недавно выгоревшим. Горизонты CG и G^{\perp} характеризуются относительно монотонными профильными распределениями $\text{C}_{\text{орг.}}$. Поверхностные органогенные горизонты современных и палеопочв Байкальского региона содержат от 2,1 до 8,0% $\text{C}_{\text{орг.}}$, а к нижней части профиля значения снижаются до 0,2–0,6% [8]. Такие низкие содержания, предположительно, связаны с диагенетическими изменениями органического вещества в глубоких горизонтах почв [40], приводящих к минерализации углерода. Влияние пирогенеза на содержание $\text{C}_{\text{орг.}}$ в почвах не одинаково в разных регионах [16, 40].

Содержание физической глины в почвенном разрезе Ch-S-22-1 в среднем по профилю выше в 2–3 раза, чем в разрезе Ch-S-22-2 (табл. 1). Почвы относятся к супесчаным. Для сравнения, в песчаных почвах хвойных лесов Байкальского региона более лёгкий гранулометрический состав, совокупное содержание физической глины там колеблется от 3 до 10% [15]. В работе [19] почвы характеризуются

Таблица 1 / Table 1

Содержание гранулометрических фракций в горизонтах почв / Particle content in soil horizons

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Диаметр частиц, мм / Particle size, mm						
		≥1	0,25–1	0,05–0,25	0,01–0,05	0,005–0,01	0,001–0,005	≤0,001
Разрез Ch-S-22-1. Глеезём постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-1. Gleysol post-pyrogenic permafrost Cryosol Reductaquic Pyric)								
Opir	0–11	–	–	–	–	–	–	–
G	20(25)–26(30)	0,3	2,9	48,2	24,9	11,9	7,2	4,6
CG [⊥]	26(30)–34...	0,0	4,0	24,8	47,7	9,4	9,3	4,8
Разрез Ch-S-22-2. Глеезём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-2. Gleysol oxidized-gleyic post-pyrogenic permafrost Cryosol Reductaquic Pyric)								
Opir	0–11(13)	–	–	–	–	–	–	–
G	11(13)–18(25)	0,0	0,9	54,6	33,3	3,8	5,8	1,6
CG [⊥]	18(25)–44...	0,0	4,0	32,2	49,0	6,0	7,2	1,6

Примечание: прочерк в таблице обозначает, что определения не выполнялись.
Note: a dash means that the contents were not measured.

Таблица 2 / Table 2

Концентрации макроэлементов в почвах долины р. Чары (%)
Major element concentration in soils of the Chara River valley (%)

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Концентрация элементов, % / Element concentration, %							
		Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	Mn	Fe
Разрез Ch-S-22-1. Глеезём постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-1. Gleysol post-pyrogenic permafrost (Cryosol Reductaquic Pyric)									
Opir	0–11	3,2	1,1	5,8	0,03	0,7	0,2	0,03	2,7
G	20(25)–26(30)	2,8	0,9	8,1	0,09	1,2	0,3	0,04	3,4
CG [⊥]	26(30)–34...	1,6	1,2	8,7	0,08	1,4	0,4	0,10	3,7
Разрез Ch-S-22-2. Глеезём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-2. Gleysol oxidized-gleyic post-pyrogenic permafrost (Cryosol Reductaquic Pyric)									
Opir	0–11(13)	4,8	1,8	11,6	0,09	1,5	0,4	0,04	3,4
G	11(13)–18(25)	2,9	1,2	8,1	0,10	1,4	0,4	0,05	4,1
CG [⊥]	18(25)–44...	2,6	2,6	24,3	0,08	0,2	0,2	0,10	0,6

лёгким гранулометрическим составом, при этом содержание фракции физической глины варьирует от 12 до 56%. Чаще всего содержание физической глины в профилях снижается с глубиной в 2–3 раза. В Юго-Восточном Прибайкалье отмечены более монотонные распределения фракции физической глины (от 3,02 до 9,99%), при этом также наблюдается снижение её концентрации к нижней части почвенных профилей [15].

Установлены следующие интервалы содержания макроэлементов в изученных почвах: Mg (1,6–4,8%), Al (0,9–2,6%), Si (5,8–24,3%), P (0,03–0,1%), Ca (0,2–1,5%), Ti (0,2–0,4%), Mn (0,03–0,1%), Fe (0,6–4,1%) (табл. 2).

Наибольшими концентрациями характеризуются Si, Fe и Mg со средними содержаниями, равными 11,1; 3,0 и 3,0%, соответственно.

Эти элементы распределены наиболее контрастно в профилях почв, R-коэффициенты Mg, Si и Fe равны 1,8–2,1; 0,3–0,9 и 0,7–6,7, соответственно (рис. 4).

В почвах Прибайкалья под хвойными лесами в дельте р. Селенги следующие концентрации макроэлементов: Si (68,3–75%), Ti (0,22–0,41%), Al (12,6–13,7%), Fe (1,5–2,24%), Mn (0,04–0,08%), Mg (0,43–0,62%), Ca (1,71–1,73%), Na (3,16–3,78%), K (2,88–3,28%), P (0,14–0,21%). Наиболее существенно из пирогенных горизонтов выносятся Si (70% против 73,4–75%), Al (12,8% против 13,3–13,7%) и K (2,97% против 3,09–3,28%), а накапливаются Mn (0,08% против 0,04–0,05%) и Ca (1,91% против 1,71–1,73%) [15]. Весьма контрастно профильное распределение Ca, R-коэффициент которого в исследованных горизонтах почв составляет от 0,5 до 9,8. Верх-

няя часть профиля почвы Ch-S-22-1 обеднена Ca, Ti и Fe ($R=0,5-0,9$) (рис. 4а), а в почве Ch-S-22-2 верхняя часть профиля, напротив, обогащена ими ($R=2,0-9,8$) (рис. 4б).

Микроэлементы в составе исследованных почв содержатся в следующих диапазонах: Zn (8,5–2,0 мг/кг), Rb (3,3–10,2 мг/кг), Sr (5,0–29,7 мг/кг), Y (0,7 – 4,9 мг/кг), Zr (5,6–47,1 мг/кг), Nb (0,9–4,1 мг/кг) и Pb (1,0–4,5 мг/кг) (табл. 3). Наибольшими средними концентрациями отличаются Zr (30,4 мг/кг) и Sr (20,7 мг/кг), средние содержания остальных исследованных микроэлементов в 3–5 раз ниже. Содержания Zn и Pb в почвах сосновых лесов Западного Забайкалья значительно выше, чем в изученных нами почвах Чарской котловины – от 13,3 до 113,9 и от 20,3 до 49,6 мг/кг, соответственно [40].

Микроэлементы, за исключением Rb, Sr и Zr, отличаются сходными тенденциями профильных распределений в обоих профилях почв. Верхние части профилей почв Ch-S-22-1 и Ch-S-22-2 обеднены Zn, Y, Nb и Pb (рис. 5), причём недавно выгоревший горизонт O обеднён ими сильнее, чем пройденный пожаром 28 лет назад Opir (рис. 5). Если Rb распределён в профиле почвы Ch-S-22-1 относительно слабоконтрастно ($R=0,8$), то Sr и Zr, напротив, очень слабо закрепляются в верхней части профиля этой почвы, особенно в поверхностном органогенном горизонте O ($R=0,2$) (рис. 5а).

Во втором профиле, напротив, значения коэффициента R показывают сильное накопление Rb, Sr и Zr в верхней его части. Здесь они имеют значения 3,1 (Rb), 3,6–4,0 (Sr) и

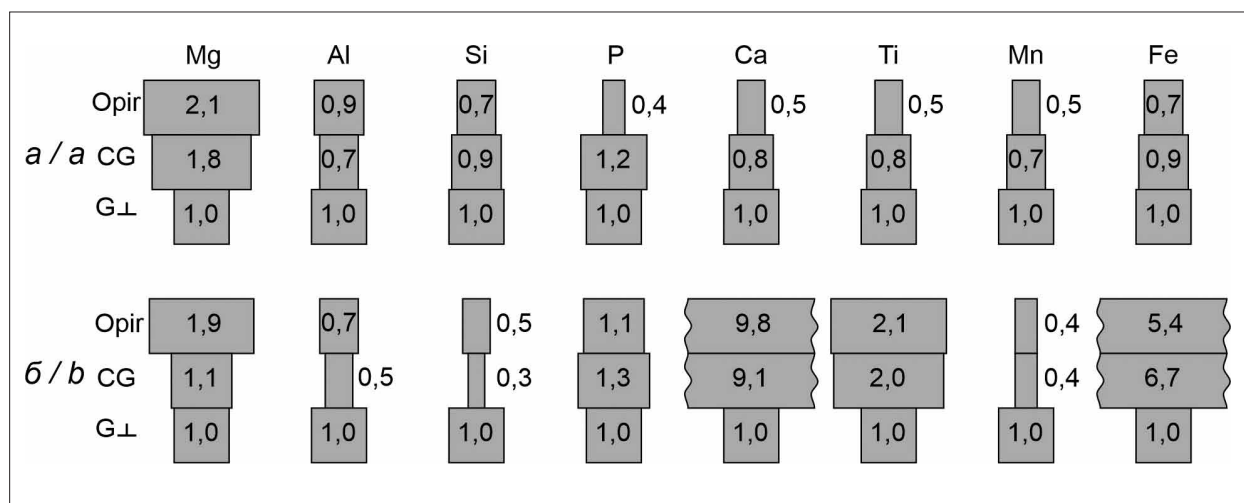


Рис. 4. Коэффициенты радиальной дифференциации (R) макроэлементов в разрезах почв Ch-S-22-1 (а) и Ch-S-22-2 (б)

Fig. 4. Radial differentiation ratios (R) of macroelements in Ch-S-22-1 (a) and Ch-S-22-2 (b) soil pits profiles

Таблица 3 / Table 3

Концентрации микроэлементов в почвах долины р. Чары (%)
Trace-element concentration in soils of the Chara River valley (%)

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Концентрация элементов, мг/кг Element concentration, mg/kg						
		Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Pb
Разрез Ch-S-22-1. Глеезём постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-1. Gleysol post-pyrogenic permafrost (Cryosol Reductaquic Pyric)								
Opir	0–11	2,0	8,4	5,0	0,7	10,5	0,9	1,0
CG	20(25)–26(30)	6,6	8,4	25,9	2,6	41,9	2,7	1,8
G⊥	26(30)–34...	5,4	10,2	29,3	3,4	47,1	4,1	2,0
Разрез Ch-S-22-2. Глеезём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-2. Gleysol oxidized-gleyic post-pyrogenic permafrost (Cryosol Reductaquic Pyric)								
Opir	0–11(13)	6,9	10,2	29,7	2,9	43,1	3,6	1,7
CG	11(13)–18(25)	7,6	10,2	26,8	3,0	34,1	3,8	2,7
G⊥	18(25)–44...	8,5	3,3	7,5	4,9	5,6	4,1	4,5

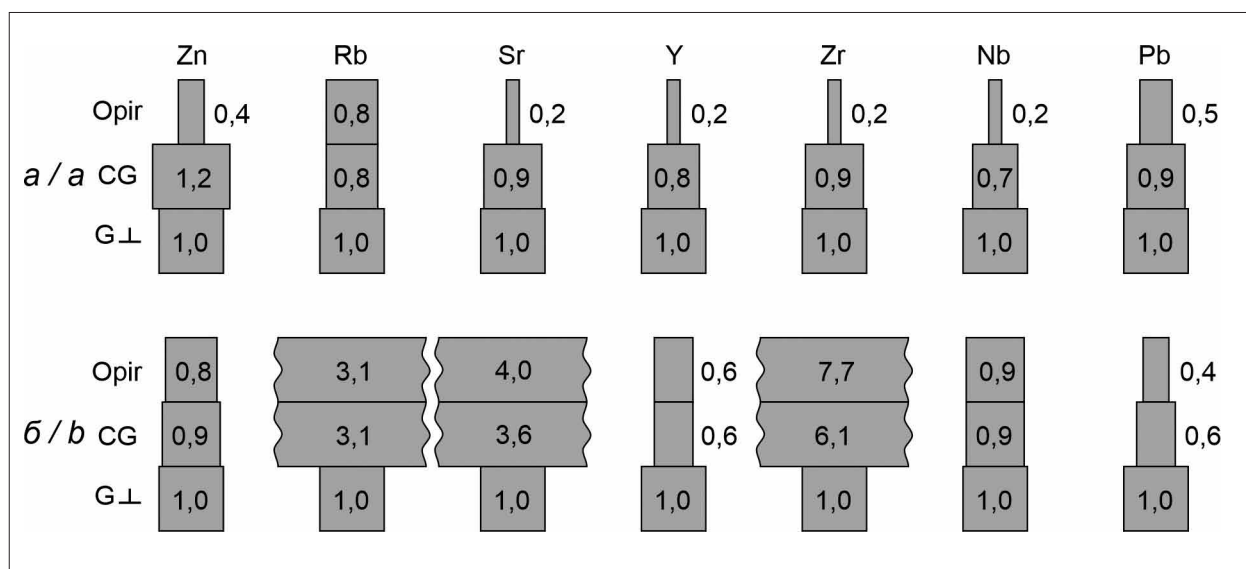


Рис. 5. Коэффициенты радиальной дифференциации (R) микроэлементов в разрезах почв Ch-S-22-1 (а) и Ch-S-22-2 (б)

Fig. 5. Radial differentiation ratios (R) of trace elements in Ch-S-22-1 (a) and Ch-S-22-2 (b) soil pits profiles

6,1–7,7 (Zr) (рис. 5б). Установлено, что под воздействием низовых лесных пожаров незначительно увеличиваются валовые содержания и концентрации подвижных форм Zn, Cu, Pb в слое почв глубиной от 0 до 40 см, а также содержания Zn и Pb в организмах растений на горях [40]. Среди изученных элементов степень интенсивности захвата и накопления распределяется таким образом: Pb, Cr – средний захват; Cd, Co, Ni – среднее накопление; Zn, Cu – среднее и интенсивное накопление. Здесь полученные нами результаты вступают в противоречие с данными работы [40], поскольку в ней продемонстрирован вынос Zn и Pb из пирогенных горизонтов с разной степенью активности ($R_{Zn}=0,4-0,8$ и $R_{Pb}=0,5-0,4$) (рис. 5а, б). Наиболее интенсивно в подстилке концентрируются Zn и Cd, а Pb, Cu, Co и Ni накапливаются слабее (весь ряд концентраций выглядит так: $Zn > Cd > Pb > Cu > Co > Ni$). Среди изученных элементов повышение концентраций Zn, Co, Cd и Pb отмечается в постпирогенных горизонтах почв, а для Cu и Ni характерно снижение концентраций после пожара. Тем не менее, отмечается, что на элементный состав может влиять не только пожар, но и, в меньшей степени, геохимическая обстановка территории [39].

В настоящее время реальные масштабы и частота воздействия антропогенно-пирогенного фактора на светлехвойные леса Забайкалья многократно превосходят естественную эволюционно обусловленную норму. Ключевые участки, представленные в

данном исследовании, в июле 2024 г. подверглись интенсивным пожарам, постпирогенное почвообразование продолжится уже в иных условиях.

Заключение

В почвах долины р. Чары выявлены признаки пирогенеза – обгоревшие остатки подстилки и крупные угольки в горизонте Opig. Описанным глеезёмам был присвоен подтип постпирогенные. Полные названия описанных почв – глеезём постпирогенный мерзлотный (разрез Ch-S-22-1, время с момента пожара – 3 года) и глеезём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный (разрез Ch-S-22-2, возраст пожара – 28 лет). $pH_{вод}$ варьирует в пределах 3,9–5,1, pH_{KCl} имеют значения 3,5–4,9, Нг – 3,3–4,5 ммоль (экв)/100 г. Кислотность почв, предположительно, не регулируется процессом пирогенеза, а в основном зависит от содержания слабых органических соединений. Общее содержание $C_{орг}$ в изученных почвах достигает 8,7%, а наименьшее составляет 0,9%. Характерно резкое снижение содержания $C_{орг}$ с глубиной почвы. Концентрация органического углерода увеличивается в почвах, поверхностный органогенный горизонт которых был уничтожен пожаром 3 года назад, по сравнению с более старым пожаром. Содержание физической глины варьирует от 4,3 до 16,3%, при этом с глубиной концентрация этой фракции возрастает. Одними из наиболее верных признаков пирогенеза яв-

ляется обеднение подстилочных горизонтов почв такими макроэлементами, как Al и Si, коэффициенты радиальной дифференциации которых имеют значения 0,7–0,9 и 0,5–0,7 соответственно. Многие микроэлементы демонстрируют уменьшение концентраций в свежих постпирогенных горизонтах ($R=0,2-0,8$) и контрастные накопления в более старых постпирогенных горизонтах ($R=3,1-7,7$), что может быть связано с изначальным обогащением минеральных горизонтов почв этими микроэлементами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (номер проекта РНФ №23-17-00082). Авторы благодарны зав. лаб. геокриологии ИГЭ им. Е.М. Сергеева РАН, к. г.-м. н. Д.О. Сергееву и м. н. с. ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (г. Салехард) В.А. Паламарчук за помощь в организации и проведении полевых работ, а также профессору географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д. б. н. М.И. Герасимовой за помощь в классифицировании и диагностировании почв.

References

1. Atlas of Transbaikalia (Buryat ASSR and Chita Oblast). Moskva, Irkutsk: GUGK, 1967. 176 p. (in Russian).
2. Batuev V.I., Ganul A.G., Novikov S.M. The age of the “relict” bogs of the northern part of West Siberia // TSPU Bulletin. 2015. No. 2 (155). P. 185–191 (in Russian).
3. Bogdanov V.V., Prokushkin S.G. The role of the slope exposition in the after-fire transformation of carbon in the larch forest soils of the central Siberia cryolithozone // Bulletin of KrasGAU. 2015. No. 9. P. 3–8 (in Russian).
4. Swamps of Western Siberia, and their role in the biosphere / Ed. A.A. Zemtov. Tomsk: TGU, SibNIIT, 2000. 72 p. (in Russian).
5. Vazhenina L.N., Lozhkin A.V. Early Holocene peatlands of North-East of Siberia // Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. 2013. No. 5. P. 74–84 (in Russian).
6. Vasil'chuk Yu.K., Ginzburg A.P., Budantseva N.A., Vasil'chuk J. Yu. Cryogenic soils in the Chara River valley, Transbaikalia // Arctic and Antarctic. 2022. No. 3. P. 54–91 (in Russian). doi: 10.7256/2453-8922.2022.3.38689
7. Geological map of the USSR. Scale 1:200,000. Bodaibinskaya series. Sheet O-50-XXIX / Ed. A.M. Leites. Moskva: All-Union Aerogeological Scientific and Production Association “Aerogeology” of the Ministry of Geology of the USSR, 1975 (in Russian).
8. Golubtsov V.A. Stable carbon isotopic composition of Late Pleistocene and Holocene soil organic matter of the Baikal region // Pochvovedenie. 2020. No. 6. P. 673–690 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X20060040
9. Jones B.M., Kanevskiy M.Z., Shur Y., Gaglioti B.V., Jorgenson M.T., Ward Jones M.K., Veremeeva A., Miller E.A., Jandt R. Post-fire stabilization of thaw-affected permafrost terrain in northern Alaska // Sci Rep. 2024. V. 14. No. 1. Article No. 8499. doi: 10.1038/s41598-024-58998-5
10. Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C., Walter Anthony K., Olefeldt D., Schuur E.A.G., Grosse G., Kuhry P., Hugelius G., Koven C., Lawrence D.M., Gibson C., Sannel A.B.K., McGuire A.D. Carbon release through abrupt permafrost thaw // Nat. Geosci. 2020. V. 13. P. 138–143. doi: 10.1038/s41561-019-0526-0
11. Du R., Peng X., Frauenfeld O.W., Jin H., Wang K., Zhao Y., Luo D., Mu C. Quantitative impact of organic matter and soil moisture on permafrost // J. Geophys. Res.: Atmos. 2023. V. 128. No. 3. Article No. e2022JD037686. doi: 10.1029/2022JD037686
12. Jafarov E.E., Briones V., Kabeer A., Rogers B.M., Natali S., Gene H., Rutter R.M., Carman T.B. Modeling the implications of post-fire alternative successional trajectory for boreal carbon and permafrost dynamics in Interior Alaska // Proceedings of 12th International Conference on Permafrost. V. 1. Whitehorse, 2024. P. 152–159. doi: 10.52384/ICOP2024.145.1
13. Desyatkin R.V., Nikolaeva M.Ch., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., Okoneshnikova M.V., Filippov N.V. The impact of 2021 large forest fires on vegetation and soils, on the territory of distribution of light soil-forming rocks in Central Yakutia // Dokuchaev Soil Bulletin. 2024. No. 118. P. 231–275 (in Russian). doi: 10.19047/0136-1694-2024-118-231-275
14. Gyninova A.B., Dyrzhinov Zh.D., Gonchikov B.N., Hamnuyeva T.R. Features of the transformation of soils under the influence of fires in the pine forests of the Baikal region // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. Geografiya. 2018. No. 1. P. 44–53 (in Russian). doi: 10.18101/2587-7143-2018-1-44-53
15. Gyninova A.B., Dyrzhinov Zh.D., Kulikov A.I., Gyninova B.D., Gonchikov B.N. Post-pyrogenic evolution of sandy soils under pine forests in the Baikal Region // Pochvovedenie. 2019. No. 4. P. 451–463 (in Russian). doi: 10.1134/S0032180X19040087
16. Chevychelov A.P., Shakhmatova E.Y. Postpyrogenic polycyclic soils in the forests of Yakutia and Transbaikalia region // Pochvovedenie. 2018. No. 2. P. 243–252 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X18020120
17. Classification and diagnostics of soils in Russia / Ed. G.V. Dobrovolskiy. Smolensk: Oikumena, 2004. 342 p. (in Russian).
18. Chevychelov A.P. Pyrogenesis and post-pyrogenic changes of peculiarities and composition of cryomorphic soils // Contemporary Problems of Ecology. 2002. No. 3. P. 273–278 (in Russian).
19. Krasnoshchekov Yu.N. Post-pyrogenic variability of litter in mountain forests of the Pribaikalie region // Pochvovedenie. 2019. V. 52. No. 3. P. 290–303 (in Russian). doi: 10.1134/S0032180X19030080

20. Krasnoshchekov Yu.N., Cherednikova Yu.S. Postpyrogenic variability of forest soils in the mountainous Baikal region. Novosibirsk: SB RAS, 2022. 164 p. (in Russian).
21. Dymov A.A. Soils of post-pyrogenic forests // Eurasian Soil Sc. 2023. V. 56. Suppl. 1. P. S84–S113. doi: 10.1134/S1064229323700217
22. Bogorodskaya A.V., Kukavskaya E.A., Kalenskaya O.P., Buryak L.V. Changes in the microbiological and physico-chemical properties of soils after fires in pine and birch forests in the central part of the Zabaikal Krai // Pochvovedenie. 2023. No. 11. P. 1418–1436 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X23600245
23. Shakhmatova E.Y. Changing the properties of litter and soils on burning in pine forests of Western Transbaikalia // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2017. V. 22. No. 3. P. 101–106 (in Russian).
24. Chebykina E.Y., Nizamutdinov T.I., Abakumov E.V. Pyrogenic territories study in subtundra forests and sparse taiga zone (on the example of Nadym forestry, YNAO) // Sustainable development of territories: theory and practice: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V. 2. Sibai: Sibayskiy informatsionnyy tsentr – filial GUP RB; Izdatelskiy dom “Respublika Bashkortostan”, 2021. P. 285–287 (in Russian).
25. Petrov D.G., Goleva A. A Pyrogenic-extreme soils of the Northern and middle taiga of Russia // Lomonosov Soil Science Journal. 2023. No. 1. P. 16–24 (in Russian). doi: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-1-16-24
26. Natural conditions of the development of the north of the Chita region / Eds. L. A. Nedeshev, V. S. Preobrazhenskiy. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1962. 124 p. (in Russian).
27. Handbook on the climate of the USSR. No. 23. Buryat ASSR, Chita Oblast. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968. 328 p. (in Russian).
28. Sergeev D.O., Stanilovskaya Yu.V., Perelshtin G.Z., Romanovsky V.E., Bezdelova A.P., Aleksyutina D.M., Bolotyuk M.M., Khimenkov A.N., Karpalova V.N., Motenko R.G., Maleeva A.N. Background geocryological monitoring in northern Transbaikalia region // Earth's Cryosphere. 2016. V. 20. No. 3. P. 24–32 (in Russian). doi: 10.21782/KZ1560-7496-2016-3(24-32)
29. Zabolotnik S.I., Klimovsky I.V. Seasonal thawing and freezing of soils in the Charskaya basin // Geocryological conditions of the Trans-Baikal North. Moskva: Nauka, 1966. P. 162–171 (in Russian).
30. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Stanilovskaya Ju.V. Early Holocene climate signals from stable isotope composition of ice wedge in the Chara Basin, northern Transbaikalia, Russia // Geosci. Front. 2018. V. 9. No. 2. P. 471–483. doi: 10.1016/j.gsf.2017.04.008
31. Shiklomanov N.I., Nelson F.E., Streletskiy D.A., Hinkel K.M., Brown J. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: data collection, management, and dissemination strategies // Ninth International Conference on Permafrost. V. 2. Fairbanks: Institute of Northern Engineering, 2008. P. 1647–1652.
32. Field soil guide. Moskva: Dokuchaev Soil Institute, 2008. 182 p. (in Russian).
33. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022.
34. Theory and practice of chemical analysis of soils / Ed. L.A. Vorobyova. Moskva: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).
35. Perelman A.I., Kasimov N.S. Geochemistry of landscape. Moskva: Izdatelstvo MGU, 1999. 768 p. (in Russian).
36. Tarabukina A.P., Savvinov D.D. The effect of fires on permafrost soils. Novosibirsk: Nauka, 1990. 120 p. (in Russian).
37. Materials of the ecological and economic justification for the creation of a natural landscape reserve of regional significance “Ingamakitskiy”. Chita: FGBUN IPREK SO RAN, 2019. 104 p. (in Russian).
38. Pigareva N.N., Korsunov V.M. Agrochemistry of soils in the cryolithozone of Transbaikalia. Ulan-Ude: Izdatelstvo BNTs SO RAN, 2004. 204 p. (in Russian).
39. Krasnoshchekov Yu.N. Soils of mountainous forests and their transformation under the impact of fires in Baikal Region // Pochvovedenie. 2018. No. 4. P. 387–401 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X18040019
40. Sosorova S.B., Merkusheva M.G., Ubugunov L.L. Pyrogenic change in the microelement content in soil and plants in the pine forests of Western Transbaikalia // Contemporary Problems of Ecology. 2013. No. 5. P. 661–674 (in Russian).