

УДК 631.416.2

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-309-332



Ссылки для цитирования:

Захарова О.Г., Чевычелов А.П. Пирогенная трансформация фосфатного состояния мерзлотных лесных почв Центральной и Южной Якутии // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 118. С. 309-332. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-309-332

Cite this article as:

Zakharova O.G., Chevychelov A.P., Pyrogenic transformation of the phosphate state of permafrost forest soils of Central and Southern Yakutia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 118, pp. 309-332, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-309-332

Пирогенная трансформация фосфатного состояния мерзлотных лесных почв Центральной и Южной Якутии

© 2024 г. О. Г. Захарова*, А. П. Чевычелов**

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Россия,
677980, Якутск, пр. Ленина, 41,*

**<https://orcid.org/0000-0002-4053-4977>, e-mail: olya.choma@mail.ru,*

***<https://orcid.org/0000-0002-2668-9745>.*

*Поступила в редакцию 14.06.2023, после доработки 21.09.2023,
принята к публикации 07.02.2024*

Резюме: Впервые изучено и оценено фосфатное состояние мерзлотных лесных постпирогенных полициклических почв Центральной и Южной Якутии, развитых соответственно в условиях аридного и гумидного климата. Данные почвы с полициклическим профилем, сформированные в трансаккумулятивных фациях этих регионов криолитозоны, содержат, помимо современного, два–три погребенных гумусовых горизонта с обильным включением черных древесных углей. Эти пирогенные гумусовые горизонты характеризуются повышенным содержанием гумуса, общего азота и фосфора, оксалаторастворимого Fe, обменных оснований, а также фракций физической глины и ила, по сравнению со смежными минеральными горизонтами почвенного профиля. При этом бурозем Южной Якутии, сформированный в менее суровых и влажных климатических условиях, по сравнению с палевой почвой, развитой в криоаридных условиях Центральной Якутии, отличался большей

биогенностью. Общее содержание Р в нем составляло 98.0–427.2 мг Р₂O₅/100 г почвы, тогда как во второй почве – только 11.0–257.1 мг Р₂O₅/100 г почвы. В составе общего Р бурозема преобладали органоминеральные фосфаты, составляя 51.8–81.3%, а в палевой почве – минеральные формы Р, на долю которых приходилось 52.2–78.8%. Во фракционном составе минеральных фосфатов обоих типов мерзлотных почв в основном преобладали фосфаты полуторных оксидов (Al-Р и Fe-Р), в совокупности составляя 43.3–94.3%, а среди последних – Fe-Р, на долю которых приходилось 34.8–87.4% от общей суммы всех фракций минеральных фосфатов. Предполагается, что высокое содержание железозосфатов, а в отдельных случаях и окклюзированных алюможелезозосфатов в мерзлотных почвах обусловлено проявлением в их генезисе как процессов криогенного, так и биогенно-пирогенного ожелезнения.

Ключевые слова: Центральная и Южная Якутия; постпирогенные почвы; физико-химические свойства; фосфор; фосфатное состояние.

Pyrogenic transformation of the phosphate state of permafrost forest soils of Central and Southern Yakutia

© 2024 O. G. Zakharova*, A. P. Chevychelov**

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 677980, Yakutsk, Lenina st., 41,*

*<https://orcid.org/0000-0002-4053-4977>, e-mail: olya.choma@mail.ru,

**<https://orcid.org/0000-0002-2668-9745>.

Received 14.06.2024, Revised 21.09.2024, Accepted 07.02.2024

Abstract: For the first time, the phosphate state of permafrost forest post-pyrogenic polycyclic soils of Central and Southern Yakutia, formed respectively in arid and humid climates, was studied and evaluated. These soils with a polycyclic profile, formed in the transaccumulative facies of this regions of the permafrost zone, contain, in addition to the modern one, 2–3 buried humus horizons with abundant inclusion of black charcoal. These pyrogenic humus horizons are characterized by an increased content of humus, total nitrogen and phosphorus soluble in iron oxalates, exchange bases, as well as fractions of physical clay and silt compared to neighboring mineral horizons of the soil profile. At the same time, the brown soil of Southern Yakutia, formed under less severe and humid climatic conditions, compared

with those of the pale soil developed under cryoarid conditions of Central Yakutia, was more biogenic, and the total content of phosphorus here was 98.0–427.2, whereas in the second soil – only 11.0–257.1 mg P₂O₅/100 g of soil. Organophosphates predominated in the composition of the total phosphorus of buruzem, amounting to 51.8–81.3%, and in pale soil – mineral forms of phosphorus, which accounted for 52.2–78.8%. The fractional composition of mineral phosphates of both types of permafrost soils was mainly dominated by phosphates of one and a half oxides (Al-P and Fe-P), totaling 43.3–94.3%, and among the latter – Fe-P, which accounted for 34.8–87.4% of the total amount of all fractions of mineral phosphates. It is assumed that the high content of iron phosphates, and in some cases occluded aluminum-iron phosphates in the studied permafrost soils, is due to the manifestation of both cryogenic and biogenic pyrogenic ferruginization in their genesis.

Keywords: Central and Southern Yakutia; post-pyrogenic soils; physico-chemical properties; phosphorus; phosphate state.

ВВЕДЕНИЕ

География, генезис и свойства данных постпирогенных полициклических почв, в том числе бурозема и палевой почвы, довольно полно были изучены ранее (Чевычелов, 1997; Краснощечков, 2011; Чевычелов, Шахматова, 2018; Jonson, 1971). В частности, отмечалось, что в трансаккумулятивных фациях ландшафтов лесных регионов Якутии формируются почвы с полициклическим профилем, содержащие, помимо современного, 2–3 погребенных гумусовых горизонта с обильным включением черных древесных углей. Последнее указывает на то, что за период своего развития данные почвы прошли 2–3 цикла начального почвообразования, прерываемого сильными низовыми пожарами, активизирующими экзогенные геоморфологические процессы. При этом наступает перерыв в почвообразовании, которое впоследствии продолжается на новом чехле “свежих” делювиальных отложений, смытых с поверхности водоразделов и покрывающих частично срезанные поверхностные гумусовые горизонты исходных почв.

Фосфатное состояние основных типов мерзлотных почв Центральной и Южной Якутии было исследовано довольно полно, особенно в последнее время (Чевычелов, Захарова, 2020; Чевычелов и др., 2023). А вот фосфатное состояние этих оригинальных

постпирогенных почв, которые отличаются сложным строением почвенных профилей, а также спецификой вещественного состава, до последнего времени оставалось не изученным. По этой причине целью представленной статьи являлось исследование фосфатного состояния данных почв в связи с особенностями их строения, свойств и состава, а также ландшафтно-климатических условий формирования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись две мерзлотные почвы, развитые в различных ландшафтно-климатических условиях Якутии. Приведем их географические и морфологические характеристики.

Разрез 16-89ТУ заложен в Южной Якутии, на Алдано-Учурском хребте, в 3 км ниже острова Курунг-Хохоё-Арыта по левому берегу р. Учур, на склоне водораздела крутизной 10°, растительность – березняк ольховнико-кедровостланиковый осоково-брусничный. Географические координаты: 58°06'30" N; 131°03'42" E, абсолютная высота (H) – 700 м над ур. м. Строение профиля: O(0–2) – AYpir(2–9) – BM(9–29) – [AYpir](29–43) – BM(43–51) – [AYpir](51–57) – BCm(57–72 см). Почва: бурозем типичный постпирогенный на серии погребенных буроземов постпирогенных.

Разрез 2Ч-14 заложен в окрестностях г. Якутска, в нижней части склона коренного берега р. Лена, на делювиальном шлейфе, на поляне в смешанном березово-сосновом лесу разнотравно-злаковом. Географические координаты заложения разреза: 62°01'59,6" N; 129°37'09,3" E, H – 104 м. Строение профиля: Av(0–2) – AJ(2–17) – BPL/BC(17–31) – [AYpir](31–35) – BC(35–40) – [AYpir](40–50) – BC(50–74) – [AYpir](74–82) – BC(82–120) – C(120–160 см). Почва: палевая типичная постпирогенная на серии погребенных постпирогенных серогумусовых почв.

Климат Южной Якутии в целом может быть охарактеризован как холодный очень континентальный и гумидный, Центральной Якутии – холодный резко континентальный и аридный. При этом здесь, по данным метеостанции “Алдан”, годовое количество осадков составляет 528 мм, среднегодовая температура воздуха –

(-6.2 °С), сумма среднесуточных температур воздуха более 10 °С – 1 281 °С, коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову – 1.4, коэффициент континентальности – 230. В то же время аналогичные показатели по метеостанции “Якутск” уже составляли соответственно – 234 мм, -10.2 °С, 1 565 °С, 0.3 и 302 (Научно-прикладной справочник..., 1989). Следовательно, климат Южной Якутии, по сравнению с таковым Центральной Якутии, характеризуется как менее континентальный и менее холодный, но при этом более влажный.

При проведении почвенных исследований использовались сравнительно-географический, сравнительно-аналитический (Роде, 1971) и профилно-генетический методы (Розанов, 1983), а изучение свойств данных почв осуществлялось по общепринятым в почвоведении методикам (Аринушкина, 1970; Воробьева, 1989). При этом рН_{H2O} определялся на иономере “Мультигест ИПЛ-101”, гумус – по Тюрину, обменные катионы в карбонатных почвах – по Шмуку, в бескарбонатных – по Гедройцу, гранулометрический состав – по Качинскому (Практикум..., 1980). Общий фосфор (Р) определялся методом прокаливания по Сандерсу и Вильямсу, органический Р – по разнице общего количества Р и суммарного содержания его минеральных форм, выделяемых по методике Чанга-Джексона (Агрохимические методы..., 1975). Корреляционный и вариационно-статистический анализы проводились в соответствии с принципами математической статистики в почвоведении (Дмитриев, 2009). Диагностика и классификация изучаемых почв осуществлялась в соответствии с принципами классификации и диагностики почв России (Классификация..., 2004).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические свойства изучаемых лесных почв (табл. 1), с одной стороны, целиком отражают ландшафтно-климатическую специфику зонального почвообразования, а с другой стороны – влияние пирогенеза как природного регулярно действующего фактора почвообразования в исследуемом регионе (Чевычелов, 1997; Петров, 2020).

Палевая типичная почва Центральной Якутии формируется в основном в слабощелочных условиях внешней среды (Мякина,

Аринушкина, 1979). Содержание гумуса в погребенных гор. Аріг – среднее или низкое, а в минеральных гор. ВС и С – очень низкое и не превышает 1%. Почвенно-поглощающий комплекс (ППК) данной почвы насыщен основаниями, гранулометрический состав по всему профилю, как правило, песчаный и лишь в погребенных гор. АУріг утяжеляется до супесчаного. Содержание несиликатного Fe по Тамму в общем незначительное и составляет в гор. С 0.12%, увеличиваясь в современном и погребенных гумусовых горизонтах в 1.5–3.0 раза, иногда немного больше.

Напротив, бурозем Южной Якутии развивается в слабокислых условиях почвообразования, общее количество гумуса и азота здесь значительно повышено, особенно в современном и погребенных гумусовых горизонтах, в составе ППК отмечается значительное присутствие обменного H^+ , составляющее 25.9–59.2% от суммы обменных катионов. Гранулометрический состав этой почвы по профилю значительно изменяется от супесчаного до легко- и среднесуглинистого, однозначно указывая на внутрипрофильную слоистость. Содержание Fe по Тамму в данном буроземе значительно выше, чем в палевой почве, и составляет 0.51–2.45%, т. е. увеличивается почти в 5 раз (табл. 1). Сопоставляя свойства данных почв, необходимо однозначно отметить, что бурозем Южной Якутии обладает большей биогенностью и повышенной степенью ожелезнения по сравнению с палевой почвой Центральной Якутии.

Так, в почвообразующей породе палевой почвы, представленной сильновыветрелым супесчаным аллювием р. Лены, содержалось более чем в 3.2 раза меньше общего P, по сравнению с таковой бурозема, состоящей из дериватов кристаллических горных пород – гранито-гнейсов. При этом если количество здесь минерального P относительно сопоставимо и составляет соответственно 19.9 и 21.4 мг $P_2O_5/100$ г почвы, то содержание органофосфатов, отмечаемое в первой почве, уже в 6 раз выше аналогичного во второй. Последнее объясняется более чем 10-кратным увеличением содержания гумуса в гор. CD бурозема (1.8%) по сравнению с гор. С палевой почвы (0.1%) (см. табл. 1). Известно, что в составе гуминовых кислот может находиться от 2–3 до 50–80% всего органического P почвы. При этом содержание P в гуминовых кисло-

тах колеблется от 0.03–0.05 до 0.3–0.5% (Орлов и др., 2005).

В составе общего Р бурозема Южной Якутии абсолютно преобладали органофосфаты, на долю которых приходилось 51.8–81.3%, в то время как в палевой почве Центральной Якутии, наоборот, минеральные формы фосфатов относительно составляли от 52.2 до 88.2% от общего количества Р. В связи с высоким содержанием органофосфатов в изучаемом буроземе необходимо указать, что такое их максимальное количество (50–90%) характерно только для фосфатного состояния наиболее плодородных черноземных почв (Попович, 1992). В связи с оценкой пулов органофосфатов в черноземных почвах необходимо также отметить, что, по данным К.Е. Гинзбург (1981), на долю органических соединений в почвах приходится от 10–20 до 70–80% общих запасов Р. При этом максимум содержания органической фракции Р выпадает на зону черноземных почв, минимум содержания этой фракции – на зону дерново-подзолистых, каштановых и сероземных почв. Последнее положение также подтверждается и для черноземов Сибири. При этом сибирские черноземы отличаются от черноземов Европейской части России более высоким содержанием (37–81% от валового) органических фосфатов (Богданов, 1954).

Повышенная биогенность бурозема, по сравнению с палевой почвой, также подтверждается данными по содержанию в них гумуса и азота (см. табл. 1). Отмеченная существенная разница в содержании общего Р в гор. CD бурозема и гор. С палевой почвы также подтверждается и для других минеральных и гумусовых горизонтов почвенных профилей изучаемых почв, при этом в обоих типах данных почв общее количество фосфора, отмечаемое в погребенных пирогенных гумусовых горизонтах, значительно возрастает по сравнению со смежными минеральными горизонтами почвенного профиля (табл. 2).

Отмеченная выше тенденция относительной биогенности изучаемых почв целиком подтверждается в оценке содержания и распределения в них общего Р (табл. 2).

Таблица 1. Физико-химические свойства мерзлотных пирогенно-трансформированных почв Центральной и Южной Якутии

Table 1. Physico-chemical properties of permafrost pyrogenic-transformed soils of Central and Southern Yakutia

Гори- зонт	Глубина, см	pH _{NH₂O}	Гумус	Азот	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г почвы			Фракции, %		Fe ₂ O ₃ по Тамму, %
			%		Ca ²⁺	Mg ⁺²	H ⁺	<0.001 мм	<0.01 мм	
Палевая типичная постпирогенная на серии погребенных постпирогенных серогумусовых почв, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)										
Av	0–2	7.3	14.1	-	30.7	5.7	-	4.6	5.8	0.13
AJ	4–14	6.7	5.6	0.28	23.4	7.4	-	6.7	8.4	0.18
BPL/BC	18–28	6.7	0.6	0.04	8.4	1.4	-	4.2	6.3	0.12
[AYpir]	31–35	7.2	3.1	0.12	20.8	6.9	-	6.9	10.3	0.40
BC	35–40	7.5	0.8	0.03	8.2	2.7	-	4.5	6.4	0.13
[AYpir]	40–50	7.5	3.2	0.13	20.5	4.7	-	8.1	12.9	0.38
BC	55–65	7.9	0.5	0.02	7.9	1.4	-	6.0	7.5	0.16
[AYpir]	74–82	7.8	5.5	0.26	30.5	6.6	-	9.6	16.1	0.36
BC	90–100	8.3	0.8	0.03	10.9	2.2	-	6.7	9.5	0.14
C	140–150	8.3	0.1	0.02	9.2	1.3	-	6.0	7.6	0.12

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Гори- зонт	Глубина, см	pH _{H₂O}	Гумус	Азот	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г почвы			Фракции, %		Fe ₂ O ₃ по Тамму, %
			%	Ca ²⁺	Mg ⁺²	H ⁺	<0.001 мм	<0.01 мм		
Бурозем типичный постпирогенный на серии погребенных буроземов постпирогенных, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)										
AУpir	2–9	5.1	17.3	0.54	13.6	3.4	15.1	9.3	27.4	0.72
BM	15–25	5.4	7.5	0.28	6.2	2.1	11.6	12.9	34.0	0.79
[AУpir]	30–40	5.2	14.7	0.40	4.9	1.0	14.4	9.3	28.6	1.48
BM	43–51	5.6	3.7	0.10	4.3	2.1	6.1	4.2	15.3	1.72
[AУpir]	51–57	5.2	32.2*	0.90	10.1	6.7	24.4	5.5	20.7	2.45
BCm	60–70	5.7	8.7	0.29	9.6	0.9	11.0	11.7	33.9	1.58
CD	70–80	6.9	1.8	-	4.2	1.8	2.1	3.2	10.3	0.51

Примечание. * – приведено значение потери при прокаливании, прочерк – не определено.

Note. * – the value of loss on ignition is given, dash – not defined.

Таблица 2. Содержание фосфора в мерзлотных лесных пирогенно-трансформированных почвах Центральной и Южной Якутии (где $P_{\text{общ.}}$ – общий фосфор, $P_{\text{орг. соед.}}$ – фосфор органических соединений, $P_{\text{мин.}}$ – фосфор минеральных соединений)

Table 2. Phosphorus content in permafrost forest pyrogen-transformed soils of Central and Southern Yakutia (where P_{total} – total phosphorus, $P_{\text{org. comp.}}$ – phosphorus in organic compounds, $P_{\text{min. comp.}}$ – phosphorus in mineral compounds)

Горизонт	Глубина, см	$P_{\text{общ.}}$, мг $P_2O_5/100$ г почвы	$P_{\text{орг. соед.}}$		$P_{\text{мин.}}$	
			мг $P_2O_5/100$ г почвы	% от общего	мг $P_2O_5/100$ г почвы	% от общего
Палевая типичная постпирогенная на серии погребенных постпирогенных серогумусовых почв, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)						
Av	0–2	257.1	104.4	40.6	152.7	59.4
AJ	4–14	250.2	103.9	41.5	146.3	58.5
BPL/BC	18–28	143.0	60.2	42.1	82.8	57.9
[AYpir]	31–35	103.8	41.2	39.7	62.6	60.3
BC	35–40	60.0	28.7	47.8	31.3	52.2
[AYpir]	40–50	50.4	13.0	25.8	37.4	74.2
BC	55–65	34.9	7.4	21.2	27.5	78.8
[AYpir]	74–82	36.4	8.4	23.1	28.0	76.9
BC	90–100	11.0	1.3	11.8	9.7	88.2
C	140–150	35.2	15.3	43.5	19.9	56.5

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

Горизонт	Глубина, см	Р _{общ.} мг P ₂ O ₅ /100 г почвы	Р _{орг.соед.}		Р _{мин.}	
			мг P ₂ O ₅ /100 г почвы	% от общего	мг P ₂ O ₅ /100 г почвы	% от общего
Бурозем типичный постпирогенный на серии погребенных буроземов постпирогенных, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)						
О	0–2	310.9	164.2	52.8	146.7	47.2
AУpir	2–9	427.2	241.3	56.5	185.9	43.7
ВМ	15–25	282.2	150.2	53.2	132.0	46.8
[AУpir]	30–40	308.8	160.0	51.8	148.8	48.2
ВМ	43–51	98.0	65.4	66.7	32.6	33.3
[AУpir]	51–57	195.7	140.7	71.9	55.0	28.1
ВСm	60–70	131.9	97.2	73.7	34.7	26.3
СD	70–80	114.3	92.9	81.3	21.4	18.7

Содержание всех форм минеральных фосфатов в изучаемых почвах изменяется значительно и составляет в палевой почве Центральной Якутии 9.7–152.7, а в буроземе Южной Якутии – 21.4–185.9 мг $P_2O_5/100$ г почвы (табл. 3).

При этом в аналогичных горизонтах почвенного профиля общее количество данных фосфатов значительно выше в буроземе, чем в палевой почве. Во фракционном составе данных минеральных фосфатов в изучаемых почвах в основном преобладали фосфаты полуторных оксидов, а среди последних – железофосфаты. Так, относительное суммарное содержание Al-P и Fe-P в палевой почве составляло 43.3–93.6%, а Fe-P – 26.8–85.1%, а в буроземе соответственно 58.3–94.3% и 16.9–87.4%. Также отмечается относительно высокое количество окклюдированных алюмо-железофосфатов, фиксируемое в средней части профиля палевой почвы на глубине 35–82 см, которое было равно 14.2–21.4% от общей суммы минеральных фосфатов. Лишь в гор. BC и C палевой почвы относительно преобладали рыхлосвязанные и окклюдированные алюмо- и железофосфаты, составляя соответственно 32.0 и 54.0%, а в гор. CD бурозема – Ca-P, относительное содержание которых было равно 71.5%. При этом необходимо отметить, что относительная доля Fe-P в постпирогенных погребенных гумусовых горизонтах обеих почв, как правило, значительно возрасла по сравнению с таковыми, отмечаемыми для смежных минеральных горизонтов почвенного профиля (табл. 3), что связано с биогенно-пирогенным ожелезнением, которое является следствием влияния пирогенеза и подтверждается данными по количеству оксалаторастворимого Fe (см. табл. 1).

Для изучения статистических параметров распределения форм фосфора и фракций минеральных фосфатов в исследованных типах мерзлотных почв Центральной и Южной Якутии был применен статистический анализ, основанный на известных принципах (Дмитриев, 2009). Полученные средние величины $P_{\text{общ.}}$, $P_{\text{орг. соед.}}$, $P_{\text{мин.}}$ и фракций минеральных фосфатов в буроземе типичном Южной Якутии оказались выше таковых, полученных для палевой типичной почвы Центральной Якутии (табл. 4). Так, средние значения $P_{\text{общ.}}$, $P_{\text{орг. соед.}}$ и $P_{\text{мин.}}$ в буроземе превышали таковые в палевой почве соответственно в 2.4, 3.6 и 1.6 раза. При

этом внутрипрофильное распределение отдельных форм Р и фракций фосфатов в данных почвах было более вариабельным, когда коэффициент вариации составлял 69–92%, а иногда и более 100%.

Для определения статистической значимости различий полученных значений данных форм Р и фракций фосфатов был использован также известный подход, связанный с применением непараметрического критерия Вилкоксона (Дмитриев, 2009) при попарном сравнении малых выборок (объемом меньше 30). При этом нулевая гипотеза (H_0) предполагает равенство значений двух выборок размером m и n , где m – объем меньшей выборки, когда выполняется условие W_x или $W_y < W_\alpha$. И, наоборот, при неравенстве величин двух выборок вступает в силу альтернативная гипотеза (H_1), при этом W_x или $W_y > W_\alpha$, для данного уровня значимости α . В нашем случае почти все величины сравниваемых форм Р и фракций фосфатов данных почв статистически достоверно различались с доверительной вероятностью $p = 0.95$ и $p = 0.99$. Лишь для фракции рыхлосвязанных фосфатов данное положение статистически достоверно не подтвердилось, когда $W_y = 28$ оказалось меньше $W_\alpha = 49$ и 43 соответственно при $\alpha = 0.05$ и $\alpha = 0.01$ (табл. 5).

Отмеченные выше тенденции изменения фосфатного состояния исследуемых мерзлотных постпирогенных полициклических почв Центральной и Южной Якутии также подтверждаются данными проведенного корреляционного анализа. Так, высокие положительные статистически значимые связи в палевой почве были обнаружены для количества Al-P и Fe-P и содержания общего, органического, а также минерального фосфора. В буроземе аналогичные корреляционные связи были выявлены только для Fe-P и $P_{\text{общ.}}$, $P_{\text{орг. соед.}}$ и $P_{\text{мин.}}$ (табл. 6). Последнее обстоятельство указывает на то, что увеличение общего количества фосфора, а также его органической и минеральных форм, в палевой почве сопровождается одновременным увеличением как Al-P, так и Fe-P, а в буроземе – в основном Fe-P (см. табл. 2, 3). При этом можно утверждать, что в составе минеральных фосфатов изучаемых мерзлотных почв, как правило, преобладающей фракцией являются Fe-P.

Таблица 3. Формы минеральных фосфатов в мерзлотных лесных пирогенно-трансформированных почвах Центральной и Южной Якутии

Table 3. Forms of mineral phosphates in permafrost forest pyrogenically transformed soils of Central and Southern Yakutia

Горизонт	Глубина, см	Формы минеральных фосфатов						
		Рыхло-связанные	Al-P	Fe-P	Ca-P	Оккл. Al-P	Оккл. Al(Fe)-P	Сумма
Палевая типичная постпирогенная на серии погребенных постпирогенных серогумусовых почв, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)								
Av	0–2	<u>6.1</u> 4.0	<u>28.8</u> 18.9	<u>112.5</u> 73.7	<u>2.0</u> 1.3	-	<u>3.3</u> 2.1	152.7
AJ	4–14	<u>3.2</u> 2.2	<u>12.4</u> 8.5	<u>124.5</u> 85.1	<u>1.2</u> 0.8	-	<u>5.0</u> 3.4	146.3
BPL/BC	18–28	<u>3.0</u> 3.6	<u>15.0</u> 18.1	<u>59.5</u> 71.9	<u>2.6</u> 3.1	-	<u>2.7</u> 3.3	82.8
[AYpir]	31–35	<u>3.0</u> 4.8	<u>10.0</u> 16.0	<u>41.0</u> 65.5	<u>3.9</u> 6.2	-	<u>4.7</u> 7.5	62.6
BC	35–40	<u>4.7</u> 15.0	<u>13.0</u> 41.5	<u>6.5</u> 20.8	<u>2.5</u> 8.0	-	<u>4.6</u> 14.7	31.3
[AYpir]	40–50	<u>4.5</u> 12.0	<u>12.0</u> 32.1	<u>13.0</u> 34.8	<u>2.6</u> 6.9	-	<u>5.3</u> 14.2	37.4
BC	55–65	<u>4.1</u> 14.9	<u>8.0</u> 29.2	<u>6.5</u> 23.6	<u>3.0</u> 10.9	-	<u>5.9</u> 21.4	27.5
[AYpir]	74–82	<u>3.9</u> 13.9	<u>6.5</u> 23.2	<u>10.8</u> 38.6	<u>2.3</u> 8.2	-	<u>4.5</u> 16.1	28.0

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Горизонт	Глубина, см	Формы минеральных фосфатов						
		Рыхло- связанные	Al-P	Fe-P	Ca-P	Оккл. Al-P	Оккл. Al(Fe)-P	Сумма
Палевая типичная постпирогенная на серии погребенных постпирогенных серогумусовых почв, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)								
BC	90–100	<u>3.1</u> 32.0	<u>1.6</u> 16.5	<u>2.6</u> 26.8	<u>2.0</u> 20.6	-	<u>0.4</u> 4.1	9.7
C	140–150	<u>3.4</u> 17.1	<u>1.2</u> 6.0	<u>4.5</u> 22.6	<u>0.7</u> 3.5	-	<u>10.1</u> 50.8	19.9
Бурозем типичный постпирогенный на серии погребенных буроземов постпирогенных, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)								
O	0-2	<u>36.5</u> 24.9	<u>18.8</u> 12.8	<u>89.0</u> 67.0	<u>0.9</u> 0.6	-	<u>1.5</u> 1.0	146.7
AУpir	2–9	<u>1.4</u> 0.7	<u>16.8</u> 9.0	<u>158.5</u> 85.3	<u>1.4</u> 0.7	<u>3.3</u> 1.8	<u>4.5</u> 2.4	185.9
BM	15–25	<u>0.4</u> 0.2	<u>9.5</u> 7.2	<u>110.0</u> 83.3	<u>1.5</u> 1.1	<u>5.1</u> 3.9	<u>5.5</u> 4.2	132.0
[AУpir]	30–40	<u>0.3</u> 0.2	<u>6.3</u> 4.2	<u>130.0</u> 87.4	<u>1.2</u> 0.8	<u>5.0</u> 3.4	<u>6.0</u> 4.0	148.8
BM	43–51	<u>1.1</u> 3.4	<u>13.5</u> 41.4	<u>5.5</u> 16.9	<u>6.4</u> 19.6	<u>3.4</u> 10.4	<u>2.7</u> 8.3	32.6

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Горизонт	Глубина, см	Формы минеральных фосфатов						Сумма
		Рыхло- связанные	Al-P	Fe-P	Ca-P	Оккл. Al-P	Оккл. Al(Fe)-P	
Бурозем типичный постпирогенный на серии погребенных буроземов постпирогенных, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)								
[AYpir]	51–57	<u>1.5</u> 2.7	<u>35.5</u> 64.5	<u>11.5</u> 20.9	<u>3.2</u> 5.8	<u>0.7</u> 1.3	<u>2.6</u> 4.7	55.0
BCm	60–70	<u>1.2</u> 3.5	<u>20.3</u> 58.5	<u>7.0</u> 20.2	<u>1.7</u> 4.9	<u>0.6</u> 1.7	<u>3.9</u> 11.2	34.7
CD	70–80	<u>0.9</u> 4.2	<u>0.3</u> 1.4	<u>4.3</u> 20.1	<u>15.3</u> 71.5	-	<u>0.6</u> 2.8	21.4

Примечание. Над чертой содержание в мг P₂O₅/100 г почвы, под чертой – в % от суммы всех фракций.
Note. Above the line – content P₂O₅/100 g of soil (mg), below the line – in % of the sum of all fractions.

Таблица 4. Статистические показатели распределения фосфатов в мерзлотных лесных пирогенно-трансформированных почвах Центральной и Южной Якутии

Table 4. Statistical indicators of phosphate distribution in permafrost forest pyrogenically transformed soils of Central and Southern Yakutia

Фосфаты	n	lim	x	S	Sx	V, %
Палевая типичная постпирогенная, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)						
Р общ.	10	11.0–257.1	98.2	90.4	28.2	92
Р орг. соед.	-/-	1.3–104.4	38.4	38.9	12.2	101
Р мин.	-/-	9.7–152.7	59.8	51.8	16.2	87
Р рыхлосв.	-/-	3.0–6.1	3.9	1.0	0.3	26
Al-P	-/-	1.2–28.8	10.8	7.8	2.4	72
Fe-P	-/-	2.6–124.5	38.1	46.2	14.4	121
Ca-P	-/-	0.7–3.9	2.3	0.9	0.3	39
Оккл. Al(Fe)-P	10	0.4–10.1	4.6	2.5	0.8	54
Бурозем типичный постпирогенный, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)						
Р общ.	8	98.0–427.2	233.6	117.0	41.8	18
Р орг. соед.	-/-	65.4–241.3	139.0	54.7	19.5	39
Р мин.	-/-	21.4–185.9	94.6	65.2	23.3	69
Р рыхлосв.	-/-	0.3–36.5	5.4	12.6	4.5	233
Al-P	-/-	0.3–35.5	15.1	10.6	3.8	70
Fe-P	-/-	4.3–158.5	64.5	64.4	23.0	100
Ca-P	-/-	0.9–15.3	3.9	4.9	1.7	126
Оккл. Al(Fe)-P	8	0.6–6.0	3.4	1.9	0.7	56

Примечание. n – объем выборки, lim – пределы изменения содержания, x – среднее значение, S – стандартное отклонение, Sx – ошибка среднего, V – коэффициент вариации.

Note. n – sample volume, lim – limits of content variation, x – mean value, S – standard deviation, Sx – mean error, V – coefficient of variation.

Таблица 5. Оценка содержаний фосфатов в мерзлотных лесных пирогенно-трансформированных почвах Центральной и Южной Якутии посредством статистики Вилкоксона

Table 5. Estimation of phosphate content in permafrost forest pyrogen-transformed soils of Central and Southern Yakutia using Wilcoxon statistics

Фосфаты	N	T	W _x	W _y	W _α , α=0.05	W _α , α=0.01
P _{общ.}	18	171	67	104	49	43
P _{орг. соед.}	---	---	61	110	---	---
P _{мин.}	---	---	81	90	---	---
P _{рыхлосв.}	---	---	143	28	---	---
Al-P	---	---	84	87	---	---
Fe-P	---	---	87	84	---	---
Ca-P	---	---	97	74	---	---
Оккл. Al(Fe)-P	18	171	108	63	49	43

Примечание. N – объем упорядоченной выборки, T – общая сумма рангов, W_x – сумма рангов выборки величины x (первой выборки), W_y – сумма рангов выборки величины y (второй выборки), W_α – критическое значение статистики Вилкоксона соответственно для α = 0.05 и α = 0.01 (Дмитриев, 2009, с. 319).

Note. N – volume of the ordered sample, T – total sum of ranks, W_x – sum of ranks of the sample of value x (the first sample), W_y – sum of ranks of the sample of value y (the second sample), W_α – critical value of the Wilcoxon statistic for α = 0.05 and α = 0.01, respectively (Dmitriev, 2009, p. 319).

Таблица 6. Значение коэффициентов корреляции между содержанием фракций минеральных фосфатов и физико-химическими свойствами пирогенно-трансформированных мерзлотных почв

Table 6. Correlation coefficients between the content of mineral phosphate fractions and physico-chemical properties of pyrogenically transformed permafrost soils

Фракции минеральных фосфатов	Физико-химические свойства							
	P _{общ.}	P _{орг.}	P _{мин.}	pH _{Н2О}	Гумус	S*	<0.001 мм	<0.01 мм
Палевая типичная, разрез 2Ч-14 (Центральная Якутия)								
Ca-P	-0.178	-0.273	-0.228	-0.206	-0.010	0.085	0.054	0.174
Al-P	0.763	0.737	0.763	-0.639	0.041	0.050	-0.532	-0.594
Fe-P	0.990	0.989	0.993	-0.787	0.520	0.366	-0.299	-0.353
Бурозем типичный, разрез 16-89ТУ (Южная Якутия)								
Ca-P	-0.616	-0.548	-0.645	0.412	-0.207	-0.300	-0.774	-0.871
Al-P	0.042	0.156	-0.057	-0.097	0.751	0.787	-0.357	-0.319
Fe-P	0.953	0.874	0.978	-0.690	0.002	0.062	0.331	0.423

Примечание. S* – сумма обменных оснований, выделены статистически значимые связи для p = 0.95.

Note. S* – sum of exchangeable bases, statistically significant relationships are highlighted for p = 0.95.

Следовательно, необходимо полагать, что высокое содержание железофосфатов в обеих изучаемых мерзлотных почвах, а также окклюдированных алюмо-железофосфатов в палевой почве, является региональной особенностью фосфатного состояния данных почв и обусловлено проявлением в их генезисе процессов как криогенного, так и биогенно-пирогенного ожелезнения.

Впервые на проявление процесса криогенного ожелезнения в мерзлотных почвах криолитозоны в свое время обратила внимание Н.А. Ногина (Ногина, 1964; Ногина и др., 1968), относя его, главным образом, к генезису мерзлотно-таежных поверхностно-ожелезненных почв Восточного Забайкалья. В частности, она отмечала по поводу генезиса данных почв, что эти почвы образованы специфическими процессами криогенного ожелезнения, то есть денатурацией и частичной кристаллизацией несиликатных форм Fe при промерзании, при этом степень криогенного ожелезнения здесь на одних и тех же породах нарастала с увеличением континентальности климата.

В наше время особенности генезиса и плодородия данных почв, связанные с педогеохимией Fe, также подтверждаются в последних исследованиях. В частности указано, что генезис и плодородие мерзлотно-таежных почв в значительной степени определяются содержанием в них подвижных соединений железа, при этом отмечается их аккумуляция в гумусовом и надмерзлотном горизонтах. Содержание подвижных форм железа по Мера и Джексону в суглинистых разновидностях этих почв может достигать больших величин порядка 1 000 мг/100 г почвы. Повышенное содержание Fe в данных почвах обуславливает микроструктуру почв и значительно уменьшает подвижность фосфатов (Савич и др., 2015).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что помимо криогенеза в формировании особенностей фосфатного состояния данных мерзлотных почв, развивающихся в ландшафтно-климатических условиях Центральной и Южной Якутии, оказывает влияние также и пирогенный фактор. Таким образом, образование и накопление Fe-P в мерзлотных лесных почвах

указанных регионов криолитозоны Якутии происходит под влиянием процессов как криогенного, так и биогенно-пирогенного ожелезнения. Исходя из всего вышесказанного можно сделать следующие основные выводы.

1. Бурозем Южной Якутии, по сравнению с мерзлотной палевой почвой Центральной Якутии, формируется в условиях более мягкого и влажного континентального климата криолитозоны и отличается более высокой биогенностью, что проявляется в его повышенной гумусированности, а также более высоком содержании общего N и P.

2. В составе фосфора бурозема абсолютно преобладали оргонофосфаты, составляя 51.8–81.3% от общего содержания данного элемента, в то время как в палевой почве, наоборот, преобладали минеральные формы P, на долю которых приходилось 52.2–88.2%.

3. Во фракционном составе минеральных фосфатов обеих изучаемых мерзлотных почв в основном преобладали фосфаты полуторных оксидов, относительное количество которых было равно 52.8–94.3%, а среди последних – фосфаты железа, содержание которых составляло 34.8–87.4%.

4. Исследуемые типы мерзлотных почв статистически достоверно различались по содержаниям почти всех форм фосфора и фракций минеральных фосфатов с высокой доверительной вероятностью $p = 0.95$ и $p = 0.99$. Лишь только для выборок количеств рыхлосвязанных фосфатов эти различия статистически не подтверждались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. Ариушикина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
3. Богданов Н.И. Валовой и органический фосфор в сибирских черноземах // Почвоведение. 1954. № 5. С. 27–32.
4. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 272 с.
5. Гинзбург К.Е. Фосфор основных типов почв СССР. М.: Изд-во “Наука”, 1981. 244 с.

6. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 328 с.
7. *Краснощеков Ю.Н.* Трансформация серогумусовых почв сосновых лесов под влиянием пожаров в юго-западном Прибайкалье // Лесоведение. 2011. № 2. С. 3–12.
8. *Мякина Н.Б., Аринушкина Е.В.* Методическое пособие для чтения результатов химических анализов почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 63 с.
9. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 24. Якутская АССР. Книга 1. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 602 с.
10. *Ногина Н.А.* Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 314 с.
11. *Ногина Н.А., Лебедева И.И., Шурыгина Е.А.* К вопросу о влиянии низких отрицательных температур на растворимость и подвижность несиликатных форм железа // Почвоведение. 1968. № 2. С. 66–75.
12. *Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И.* Химия почв. М.: Высшая школа, 2005. 558 с.
13. *Петров Д.Г.* Пути миграции углистых частиц в постпирогенных почвах тайги и тундры в зависимости от особенностей пожара и факторов среды // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 109–145. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-105-109-145](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-109-145).
14. *Попович Л.П.* Фосфатное состояние почв // Почвоведение. 1992. № 11. С. 24–35.
15. Практикум по почвоведению / Под ред. *И.С. Кауричева*. М.: Колос, 1980. 272 с.
16. *Розанов Б.Г.* Морфология почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 320 с.
17. *Роде А.А.* Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск: Наука, 1971. 92 с.
18. *Савич В.И., Скрябина Д.С., Норвосурэн Ж.* Влияние криогенеза на генезис и плодородие мерзлотно-таежных почв // Известия ТСХА. 2015. Вып. 2. С. 5–14.
19. *Чевычелов А.П.* Пирогенез и горно-таежное континентальное гумидное почвообразование на Севере-Востоке Азии (на примере Южной Якутии). Новосибирск: СО РАН, 1997. 34 с.
20. *Чевычелов А.П., Шахматова Е.Ю.* Постпирогенные полициклические почвы в лесах Якутии и Забайкалья // Почвоведение. 2018. № 2. С. 243–252.
21. *Чевычелов А.П., Захарова О.Г.* К оценке фосфатного состояния мерзлотных почв Южной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25. С. 51–59.

22. Чевычелов А.П., Захарова О.Г., Бурнашева М.П. Фосфатное состояние мерзлотных почв Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28. № 1. С. 104–116.
23. Johnson D.L. Biomante evolution ocnol the realistribution of organic matter by clay Podzol soil // Can. J. Soil. Sci. 1971. Vol. 51. No. 3. P. 509–513.

REFERENCES

1. *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv* (Agrochemical methods of soils), Moscow: Nauka, 1975, 656 p.
2. Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Guidelines for chemical analysis of soils), Moskow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1970, 487 p.
3. Bogdanov N.I., Valovoi i organicheskii fosfor v sibirskikh chernozemakh (Gross and organic phosphorus in Siberian chernozem), *Pochvovedenie*, 1954, No. 5, pp. 27–32.
4. Vorob'eva L.A., *Khimicheskii analiz pochv* (Chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1989, 272 p.
5. Ginzburg K.E., *Fosfor osnovnykh tipov pochv SSSR* (Phosphorus of the main types of soils in the USSR), Moscow: Nauka, 1981, 244 p.
6. Dmitriev E.A., *Matematicheskaya statistika v pochvovedenii* (*Mathematical statistics in soil science*), Moscow: LIBROKOM, 2009, 328 p.
7. Krasnoshchekov Yu.N., Transformatsiya serogumusovykh pochv osnovnykh lesov pod vliyaniem pozharov v yugo-zapadnom Pribaikal'e (Transformation of gray-humus soils of pine forests under the influence of fires in Southwestern Lake Baikal basin), *Lesovedenie*, 2011, No. 2, pp. 3–12.
8. Myakina N.B., Arinushkina E.V., *Metodicheskoe posobie dlya chteniya rezul'tatov khimicheskikh analizov pochv* (Methodical manual for reading the results of chemical analyzes of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1979, 63 p.
9. *Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR* (Scientific and applied reference book on the climate of the USSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, 602 p.
10. Nogina N.A., *Pochvy Zabaikal'ya* (Soils of Transbaikalia), Moscow: Nauka, 1964, 314 p.
11. Nogina N.A., Lebedeva I.I., Shurygina E.A., K voprosu vliyaniya nizkikh otritsatel'nykh temperatur na rastvorimost' i podvizhnost' nesilikatnykh form zheleza (On the effect of low negative temperatures on the solubility and mobility of non-silicate forms of iron), *Pochvovedenie*, 1968, No. 2, pp. 66–75.

12. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Suhanova N.I., *Himija pochv* (Soil Chemistry), Moscow: Vysshaja shkola, 2005, 558 p.
13. Petrov D.G., The paths of migration of charcoal particles in the post-pyrogenic soils of the taiga and tundra depending on features of fire and environmental factors, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 105, pp. 109–145, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-105-109-145](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-109-145).
14. Popovich L.P., Fosfatnoe sostoyanie pochv (Phosphate state of soils), *Pochvovedenie*, 1992, No. 11, pp. 24–35.
15. *Praktikum po pochvovedeniyu* (Practicum on Soil Science), Moscow: Kolos, 1980, 272 p.
16. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1983, 320 p.
17. Rode A.A., *Sistema metodov issledovaniya v pochvovedenii* (The system of research methods in soil science), Novosibirsk: Nauka, 1971, 92 p.
18. Savich V.I., Skryabina D.S., Norovosuren Zh., Vliyanie kriogeneza na genesis i plodorodie merzlotno-taezhnykh pochv (The Influence of cryogenesis on genesis and fertility of cryogenic and taiga cryogenic soils), *Izvestiya TSKhA*, 2015, Vol. 2, pp. 5–14.
19. Chevychelov A.P., *Pirogenез i gorno-taezhnoe kontinental'noe gumidnoe pochvoobrazovanie na Severe-Vostoke Azii (na primere Yuzhnoi Yakutii)* (Pyrogenesis and mountain-taiga continental humid soil formation in North-East Asia (on the example of South Yakutia), Novosibirsk: SO RAN, 1997, 34 p.
20. Chevychelov A.P., Shakhmatova E.Yu., Postpirogennyye politsiklicheskie pochvy v lesakh Yakutii i Zabaikal'ya (Postpyrogenic polycyclic soils in the forests of Yakutia and Transbaikal region), *Pochvovedenie*, 2018, No. 2, pp. 243–252.
21. Chevychelov A.P., Zakharova O.G., K otsenke fosfatnogo sostoyaniya merzlotnykh pochv Yuzhnoi Yakutii (To the assessment of the phosphate status of permafrost soils of Southern Yakutia), *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики*, 2020, Vol. 25, pp. 51–59.
22. Chevychelov A.P., Zakharova O.G., Burnasheva M.P., Fosfatnoe sostoyanie merzlotnykh pochv Tsentral'noi Yakutii (The phosphate status of permafrost soils in Central Yakutia), *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики*, 2023, Vol. 28, No. 1, pp. 104–116.
23. Johnson D.L., Biomante evolution ocnol the realistribution of organic matter by clay Podzol soil, *Can. J. Soil. Sci.*, 1971, Vol. 51, No. 3, pp. 509–513.