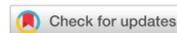


УДК 631.445.2:631.416.2

DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-92-115



Ссылки для цитирования:

Васбиева М.Т., Завьялова Н.Е. Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы естественных и агрофитоценозов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 107. С. 92-115. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-92-115

Cite this article as:

Vasbieva M.T., Zavyalova N.E., Phosphate regime of sod-podzolic soil in natural and agrophytocenoses, Dokuchaev Soil Bulletin, 2021, V. 107, pp. 92-115, DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-92-115

Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы естественных и агрофитоценозов

© 2021 г. М. Т. Васбиева*, Н. Е. Завьялова

*Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия,
12 Kultury St., 614532 Lobanovo village, Perm region,
Perm district, Russian Federation,*

*<https://orcid.org/0000-0003-4048-6319>, e-mail: vasbievamt15@gmail.com,

**<https://orcid.org/0000-0003-4005-8998>, e-mail: nezavyalova@gmail.com.

*Поступила в редакцию 09.04.2021, после доработки 21.05.2021,
принята к публикации 16.06.2021*

Резюме: Изучен фосфатный режим дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья под естественными фитоценозами (смешанный лес, злаково-разнотравный луг) и агрофитоценозами. Оценка влияния сельскохозяйственного использования пашни на фосфатный режим проведена в условиях длительного стационарного опыта (год закладки – 1978) и в посевах козлятника восточного (год посева – 1988). Изучено общее содержание фосфора в почве, количество его органических, минеральных и подвижных соединений, рассмотрен фракционный состав минеральных фосфатов (метод Гинзбург-Лебедевой). Общее содержание фосфора в верхнем слое почвы всех объектов исследования варьировало от 1 030 до 1 350 мг/кг. В почве преобладали минеральные соединения фосфора над органическими. Установлено, что фракционный состав минеральных фосфатов на 40–62% был представлен фосфатами железа и на 31–48% – фосфатами кальция, что связано с характерными особенностями почвообразующей

породы – желто-бурой некарбонатной покровной глины. Фосфаты алюминия составили 8–12%. Длительное возделывание сельскохозяйственных культур в течение пяти ротаций полевого восьмипольного севооборота привело к существенному снижению в почве содержания органических соединений фосфора. В почве длительного опыта, по сравнению с естественными фитоценозами, отмечено более низкое содержание фосфатов железа (в 1.6–1.8 раза) и более высокое содержание (в 1.3–2.0 раза) наиболее доступных для растений рыхлосвязанных и разноосновных фосфатов кальция. Отмечено постепенное снижение содержания подвижных соединений фосфора в почве контрольного варианта от момента закладки опыта к пятой ротации с 239 до 164 мг/кг. Длительное внесение $N_{60}P_{60}K_{60}$ привело к существенному увеличению в почве минеральных соединений и подвижных форм фосфора. Остаточный фосфор удобрения закрепился в виде фосфатов железа и наиболее доступных для растений рыхлосвязанных и разноосновных фосфатов кальция. Под козлятником восточным количественные и качественные показатели фосфатного режима почвы существенного не отличались от природных аналогов.

Ключевые слова: минеральные, органические, подвижные соединения фосфора, фракционный состав минеральных фосфатов, степень подвижности фосфатов, длительный стационарный опыт, минеральные удобрения.

Phosphate regime of sod-podzolic soil in natural and agrophytocenoses

© 2021 M. T. Vasbieva*, N. E. Zavyalova**

*Perm Research Institute of Agriculture of the Perm Federal Research Center
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,*

7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

* <https://orcid.org/0000-0003-4048-6319>, e-mail: vasbievamt15@gmail.com,

** <https://orcid.org/0000-0003-4005-8998>, e-mail: nezavyalova@gmail.com.

Received 09.04.2021, Revised 21.05.2021, Accepted 16.06.2021

Abstract: The phosphate regime of sod-podzolic soil (heavy loam) of Cis-Urals under natural phytocenoses (mixed forest, cereal-grass meadow) and agrophytocenoses was studied. The influence of agricultural use of arable land on phosphate regime was evaluated in the long-term stationary experiment (year of establishment – 1978) and the eastern galega (*Galega orientalis* L.) (year of sowing – 1988). The total content of phosphorus in soil, quantity of its organic, mineral and plant available forms were studied, the fractional

composition of mineral phosphates was considered (using Ginzburg-Lebedeva method). The total content of phosphorus in the upper soil layer in all studied objects varied from 1 030 to 1 350 mg/kg. Mineral phosphorus forms prevailed over organic ones in the soil. It was found that the fractional composition of mineral phosphates was 40–62% represented by iron phosphates and 31–48% by calcium phosphates, which is due to the characteristic features of the soil-forming rock – yellow-brown non-carbonate silt drupe. Aluminum phosphates amounted to 8–12%. Long-term cultivation of crops during five cycles of the eight-field crop rotation led to a significant decrease in the content of organic phosphorus in the soil. The lower content of iron phosphates (1.6–1.8 times) and the higher content (1.3–2.0 times) of calcium phosphates, available for plants, were observed in the soil of long-term experiment when compared with natural phytocenoses. The content of plant available phosphorus in soil of the control variant gradually decreased from 239 to 164 mg/kg from the moment of experiment establishment to the fifth rotation. Prolonged fertilizer application ($N_{60}P_{60}K_{60}$) resulted in the significant increase in mineral and plant available phosphorus forms content in the soil. The residual phosphorus of fertilizers was noted in the Fe-P, Ca-PI and Ca-PII fractions. Under the eastern galega the quantitative and qualitative indicators of the phosphate regime of the soil did not differ significantly from their natural analogues.

Keywords: mineral, organic, plant available phosphorus, fractional composition of mineral phosphates, degree of phosphate mobility, long-term stationary experience, mineral fertilizers.

ВВЕДЕНИЕ

Фосфор в почве является одним из основных элементов питания растений. В формировании фосфатного режима почв важную роль играют запасы общего фосфора, содержание его минеральных и органических форм. Главным источником соединений фосфора для почв служат почвообразующие породы. Для каждого типа почв существует определенное равновесие в накоплении органических и минеральных соединений фосфора, обусловленное генетическими особенностями почв, общим направлением почвообразовательного процесса и степенью их окультуренности. Минеральные соединения фосфора в почве в большинстве случаев преобладают над органическими. Минеральные формы почвенного фосфора представлены в основном фосфатами кальция и магния разной основности и подвижности и фосфатами оксидов же-

леза и алюминия ([Адрианов, 2004](#); [Сычев и др., 2009](#); [Титова и др., 2005](#)). Сельскохозяйственное использование может в значительной степени изменить фосфатный режим почвы. В почве нарушается сложившийся круговорот фосфора, формируется отрицательный баланс ([Иванов и др., 2012](#); [Волынкина, 2020](#); [Кайгородов и др., 2017](#); [Сычев и др., 2020](#)), наблюдается снижение доступных форм фосфора для растений ([Косолапова и др., 2018](#); [Красницких и др., 2020](#); [Цветнов и др., 2020](#)). Применение удобрений, особенно в высоких дозах, может способствовать формированию окультуренных почв с характерным для них фосфатным режимом отличным от природных аналогов ([Балгабаев и др., 2020](#); [Митрофанова, 2017](#); [Frense et al., 2020](#); [Li et al., 2020](#)). Могут влиять на изменение фосфатного режима почвы и приемы ее основной обработки ([Гребенников и др., 2018](#)). Обеспеченность почв фосфором является одним из важнейших показателей окультуренности почв, условием высокой продуктивности сельскохозяйственных культур и их устойчивости к неблагоприятным факторам.

Цель исследований – охарактеризовать фосфатное состояние дерново-подзолистой почвы под различными естественными и агрофитоценозами, оценить степень влияния сельскохозяйственного использования земель на фосфатный режим почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

По данным Росстата, в структуре земельного фонда Пермского края значительную площадь занимают земли лесного фонда – 10 млн га или 63.9% территории. Площадь земель сельскохозяйственного назначения составляет 4.3 млн га или 26.5%. В крае преобладают дерново-подзолистые почвы (69.5%) в основном глинистого, тяжело- и среднесуглинистого гранулометрического состава ([Кайгородов и др., 2017](#)). Почвенный покров характеризуется мелкоконтурностью и частой пространственной сменой почв, обусловленных влиянием рельефа, почвообразующих пород, уровнем грунтовых вод, характером растительного покрова. Дерново-подзолистые почвы характеризуются низким естественным плодородием, что связано с невысоким содержанием органического вещества, азота, фосфора, а также с кислой реакцией среды.

В Пермском крае, по данным государственного центра агро-

химической службы “Пермский”, в 2019 г. площадь пахотных угодий с содержанием подвижного фосфора менее 100 мг/кг составила 67% (очень низкое и низкое содержание (<50 мг/кг) – 34%; среднее (50–100 мг/кг) – 33%). Средневзвешенная обеспеченность фосфором более 100 мг/кг отмечена только в 9 из 33 районов края. За последние десять лет в Пермском крае насыщенность пашни органическими удобрениями составила 1.1 т/га, минеральными – 12.1 кг/га действующего вещества. По сравнению с 1980–1990 гг. применение минеральных удобрений снизилось в 8–9 раз, органических – в 3–4 раза. Возмещение выноса элементов питания за последние годы с учетом вносимых объемов удобрений, применения сидератов и соломы составляет 10–15%. В 1995 г. баланс элементов питания составил: –26.9 кг/га, в 2000–2003 гг. – –43.2 кг/га, а в 2019 г. – –142.4 кг/га.

Исследования проводили в IV агроклиматическом районе Пермского края. В физико-географическом отношении район находится в подзоне южной тайги и хвойно-широколиственных лесов. Климат умеренно-континентальный с холодной, продолжительной, снежной зимой и теплым коротким летом. Сумма средних суточных температур выше 10 °С составляет 1 700–1 900 °С. Длительность периода активной вегетации с температурой выше 10 °С в среднем составляет 115 дней, с температурой выше 15 °С – 60 дней. Район относится к зоне достаточного увлажнения: ГТК 1.4. Осадков за год выпадает 470–500 мм. Число дней со снежным покровом в среднем составляет 176 ([Агроклиматические ресурсы..., 1979](#)).

Исследования проводили на опытном поле Пермского НИИСХ, филиала ПФИЦ УрО РАН, в полевом восьмипольном севообороте длительного стационарного опыта (без применения удобрений, с внесением N₆₀P₆₀K₆₀), на стационарных участках под многолетней бобовой культурой – козлятником восточным (*Galega orientalis* L.), под смешанным лесом и злаково-разнотравным лугом (рис. 1). Гранулометрический состав верхнего горизонта всех почв (по Н.А. Качинскому) тяжелосуглинистый ([Zav'yalova, 2016](#)).

Лес – смешанный, с богатым травяным покровом. В древесное широко представлены береза, осина, реже клен, из хвойных –

ель, пихта, сосна. Хорошо развит второй ярус и подлесок из рябины, липы, ольхи, черемухи и др. В напочвенном покрове преобладают кисличные, кислично-папоротниковые и разнотравно-злаково-папоротниковые ассоциации. Почва не испытывает механических нагрузок. В лесном фитоценозе на поверхности почвы накапливается неразложившийся за год слой опада в виде листьев, хвои, ветвей, т. е. мощная лесная подстилка, имеющая кислую реакцию ($\text{pH} = 4.5$) из-за опада хвойных пород. Под пологом смешанного леса ее толщина составляет около 3 см.



Рис. 1. Размещение объектов исследования: 1 – длительный опыт, вариант без удобрений, 2 – длительный опыт, с внесением $\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$, 3 – козлятник восточный, 4 – луг разнотравно-злаковый, 5 – смешанный лес.
Fig. 1. Arrangement of studied objects: 1 – long-term experiment, variant without fertilizers, 2 – long-term experiment, with $\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$ application, 3 – eastern galega, 4 – cereal-grass meadow, 5 – mixed forest.

Видовой состав травостоя естественного злаково-разнотравного луга: 62% – злаковые, 13.5% – бобовые, 24.5% – разнотравье. Травостой не отчуждается. Избыточное накопление

отмершей надземной массы приводит к обеднению видового разнообразия.

Козлятник восточный был посеян в 1988 г. и используется для получения семян. После уборки солома отчуждается. Минеральные удобрения применяли только в первые годы жизни культуры.

Полевой стационарный опыт был заложен в 1978 г. Агрохимическая характеристика почвы перед закладкой опыта (слой 0–20 см): $pH_{KCl} = 5.6$; гидролитическая кислотность – 2.0, сумма поглощенных оснований – 21.0 мг-экв/100 г почвы, содержание органического углерода – 1.23%, подвижный фосфор – 175 мг/кг, обменный калий – 203 мг/кг (по Кирсанову). Севооборот парозернопропашной восьмипольный с чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, картофель, пшеница, клевер 1-го г. п., клевер 2-го г. п., ячмень, овес. Общая площадь делянки 120 м², учетная – 76.4 м². Перед закладкой опыта было проведено известкование, полная доза извести была рассчитана по гидролитической кислотности. Органические удобрения не вносили. НРК в дозе 60 кг д. в. вносили под зерновые культуры, картофель. Под клевер удобрения не вносили, изучали последствие удобрений, внесенных под предшествующие культуры. Исследования проводили в верхнем горизонте почвы 0–20 см (3–20 см – под лесом). Агрохимическая характеристика почвы представлена в таблице 1.

Общее содержание фосфора в почве, содержание его минеральных и органических соединений определяли методом прокаливания Сэндерса и Вильямса, подвижные формы фосфора – по Кирсанову, степень подвижности фосфатов – по Н.П. Карпинскому и В.Б. Замятиной, кривые растворимости фосфатов – по Бобко-Масловой. Фракционный состав минеральных фосфатов определяли методом Гинзбург–Лебедевой. Лабораторные исследования проводили в воздушно-сухих образцах почвы. Почвенные образцы в длительном опыте отбирали с двух несмежных повторений в пяти точках на каждой делянке, на других объектах исследования – на специально выделенных стационарных участках методом конверта в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017. Смешанный почвенный образец составляли квартованием из индивидуальных проб. Статистическую обработку результатов полевых и лабораторных

исследований проводили методами дисперсионного и корреляционно-регрессионного анализов с использованием пакета программ Microsoft Excel.

Таблица 1. Агрохимические свойства почвы, 2012–2013 гг.
Table 1. Agrochemical properties of soil, 2012–2013

Объект исследования	Глубина, см	pH _{KCl}	S	Hг	Ca	Mg	N _{общ} , мг/кг	C _{орг} , %
			мг-экв/100 г					
Смешанный лес	3–20	4.2	20,0	6.4	12.0	3.2	2 660	1.58
Злаково-разнотравный луг	0–20	4.8	21.2	2.2	13.9	2.5	1 490	1.25
Козлятник восточный	0–20	4.9	18.3	2.8	12.9	3.8	1 940	1.44
Полевой севооборот, без удобрений	0–20	5.2	21.4	2.4	12.0	1.8	1 120	1.06
Полевой севооборот, N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0-20	5.1	22.6	2.7	13.6	2.8	1 582	1.18
HCP ₀₅	-	0.2	1.3	0.2	0.4	0.14	120	0.07

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что в дерново-подзолистой тяжело-суглинистой почве под различными фитоценозами в верхнем горизонте общее содержание фосфора варьировало от 1 030 (\pm 68) до 1 350 (\pm 36) мг/кг (рис. 2). В почве под злаково-разнотравным лугом общее содержание фосфора было в 1.3 раза выше, чем под смешанным лесом.

В почве преобладали минеральные соединения фосфора. В почве под смешанным лесом, злаково-разнотравным лугом доля минеральных соединений фосфора составила 54–55%, органических – 45–46%. Антропогенное воздействие на почву нарушает сложившееся равновесие между органическими и минеральными формами соединений фосфора.

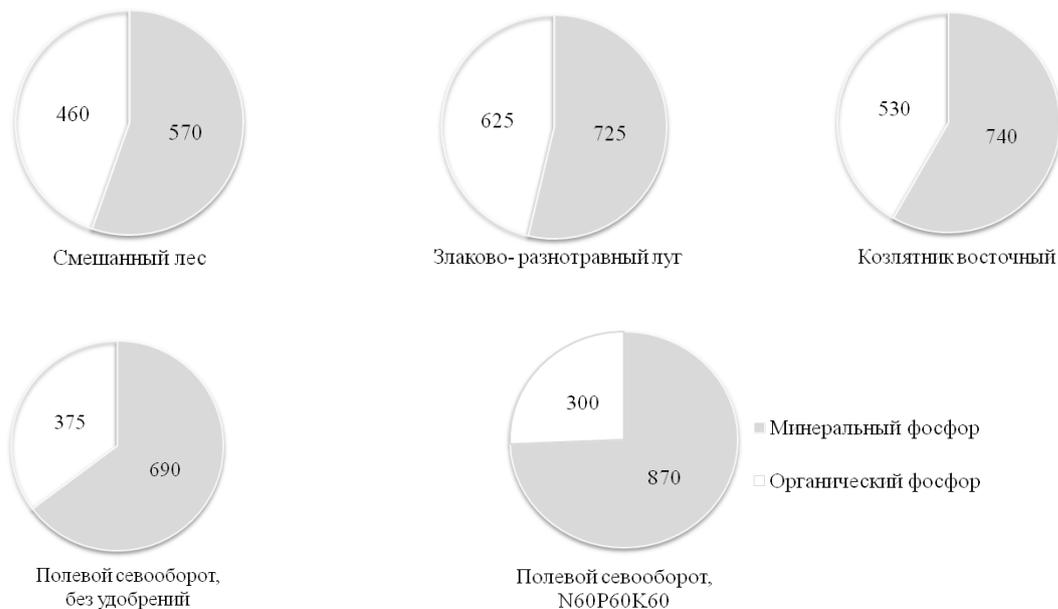


Рис. 2. Содержание минеральных и органических соединений фосфора в дерново-подзолистой почве естественных и агрофитоценозов, мг/кг.

Fig. 2. The content of mineral and organic phosphorus forms in sod-podzolic soil of natural and agrophytocenoses, mg/kg.

Длительное возделывание сельскохозяйственных культур в течение пяти ротаций полевого восьмипольного севооборота привело к снижению в почве содержания органических соединений фосфора. Их количество было в 1.7 раза ниже, чем в почве под лугом, и в 1.2 раза ниже, чем под лесом. Аналогичные результаты получены в работе J. Joneczak (2015). Доля органических соединений фосфора в данном варианте снизилась до 35%, минеральных – возросла до 65%. Полученные результаты в первую очередь связаны с уменьшением в почве содержания органического вещества. За пять ротаций отмечено снижение $C_{\text{орг}}$ с 1.23% (исходное содержание) до 1.00%. Минимальное содержание фосфора органических соединений и наибольшее содержание минеральных соединений наблюдали при внесении $N_{60}P_{60}K_{60}$. Доля органических соединений фосфора составила 26%, минеральных – 74%. По сравнению с вариантом без удобрений длительное внесение минеральных удобрений существенно повысило в почве запасы минеральных соединений фосфора – на 0.4 т/га, наблюдаются тенденции снижения запасов фосфора органических соединений (рис. 3).

В работе И.В. Гулякина и др. (1973) отмечено, что систематическое применение удобрений способствует значительному увеличению содержания в почве минеральных соединений фосфора. Согласно расчетам Гриффита (Титова, 2005), около 78% фосфора удобрений остается в почвах в форме минеральных соединений.

Под козлятником восточным соотношение органических и минеральных соединений фосфора оказалось близким к таковому в почве под смешанным лесом и злаково-разнотравным лугом. Посевы козлятника восточного с годами загущаются, количество корневых и пожнивных остатков увеличивается, следовательно, в почве повышается содержание органического вещества, что может положительно повлиять и на содержание органических соединений фосфора. Козлятник восточный – многолетнее травянистое растение озимого типа развития.

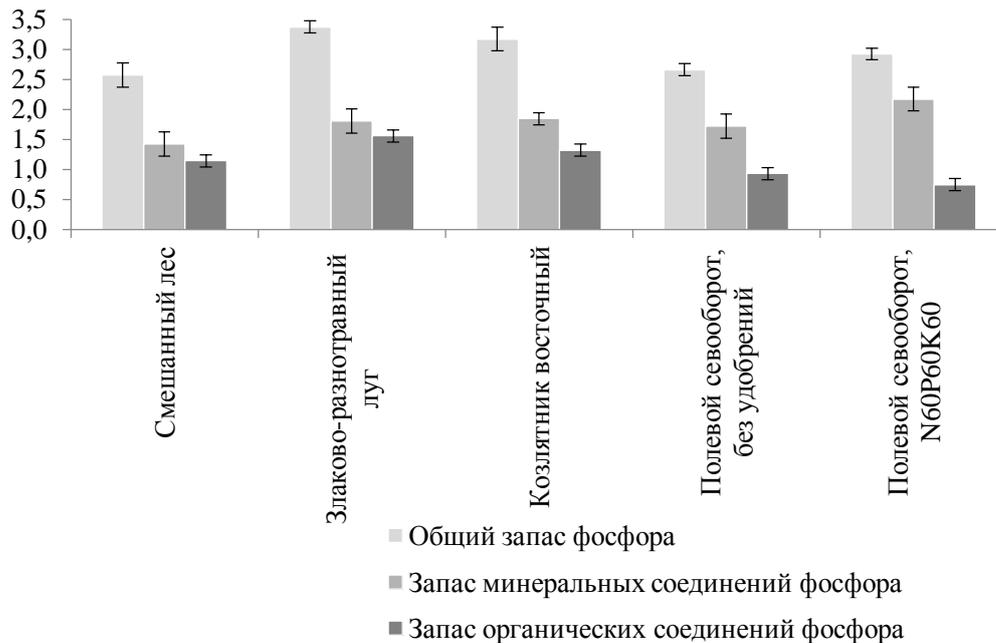


Рис. 3. Общий запас фосфора в дерново-подзолистой почве различных фитоценозов, запасы минеральных и органических соединений фосфора, т/га.

Fig. 3. Total phosphorus reserves in sod-podzolic soil of different phytocenoses, reserves of mineral and organic phosphorus forms, t/ha.

Многолетние травы считаются эффективными фитомелиорантами для воспроизводства плодородия почв: они стабилизируют гумусовое состояние, способствуют улучшению агрофизических свойств почвы, уменьшают интенсивность процесса эрозии. Со второго года жизни у культуры формируется мощная корневая система, проникающая в почву до 80–120 см. По нашим данным, козлятник ежегодно накапливает в пахотном слое почвы до 9 т корневых остатков на гектар, содержащих около 200 кг азота и 40 кг фосфора ([Zav'yalova, 2016](#)). По литературным данным, растения второго – третьего года жизни в пахотном слое почвы накапливают более 10 т/га корневой массы ([Степанов и др., 2017](#)).

Для органических соединений фосфора установлена достоверная средняя прямая корреляционная связь с содержанием органического углерода ($r = 0.5$); для минеральных соединений фосфора высокая – с показателем pH_{KCl} , содержанием обменного кальция в почве ($r = 0.7–0.8$), средняя – с суммой обменных оснований ($r = 0.5$), обратная средняя корреляционная зависимость – с содержанием органического углерода ($r = -0.6$).

Выделение из почвы отдельных минеральных форм фосфора, различающихся по химическому составу, растворимости и доступности растениям, позволяет получить представление о соотношении лабильных и труднодоступных форм фосфора в почве и предвидеть их превращения ([Гинзбург, 1981](#)). Фракционный состав минеральных фосфатов определяли методом Гинзбург–Лебедевой, который позволяет выделить пять фракций: фосфаты железа (Fe–P), фосфаты алюминия (Al–P), и три фракции фосфатов кальция (Ca–P_I, Ca–P_{II}, Ca–P_{III}), различающихся по основности, степени окристаллизованности и, следовательно, по растворимости и доступности растениям: Ca–P_I – фосфаты щелочных и щелочноземельных металлов, аммония, Ca–P_{II} – разноосновные фосфаты кальция (магния), Ca–P_{III} – труднорастворимые высокоосновные фосфаты кальция типа апатита.

Исследования фракционного состава минеральных соединений фосфора дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы показали, что наибольшую долю в их составе занимали фосфаты железа (типа стренгита, диффренита и др.) – 40–62% (рис. 4). Следующей шла фракция фосфатов кальция (Ca–P) – 31–48%.

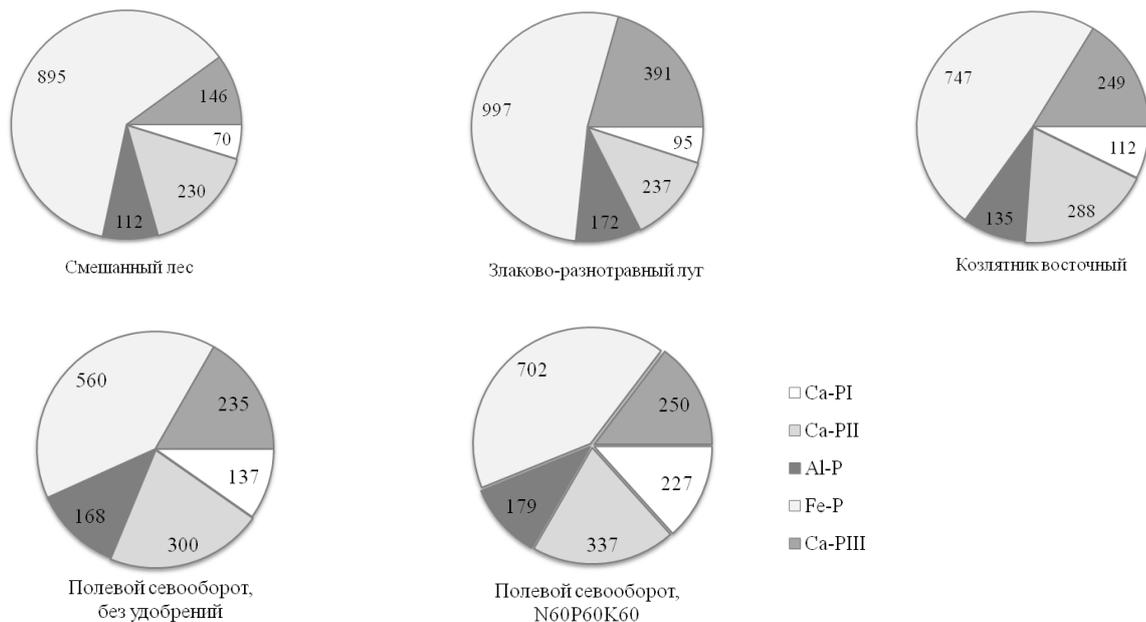


Рис. 4. Фракционно-групповой состав минеральных соединений фосфора дерново-подзолистой почвы под естественными фитоценозами и агрофитоценозами.

Fig. 4. Fractional composition of mineral phosphorus forms in sod-podzolic soil under natural phytocenoses and agrophytocenoses.

Высокое содержание фосфатов железа объясняется повышенным содержанием железа в данных почвах ([Адрианов, 2004](#); [Титова и др., 2005](#)). Почвообразующей породой исследуемой почвы является желто-бурая некарбонатная покровная глина. Характерной особенностью почвы, сформированной на богатых в минералогическом отношении пермских глинах, является высокое содержание обменных форм кальция и магния (которое, как и сумма поглощенных оснований, увеличивается с глубиной), что объясняет высокое содержание Са–Р.

Фосфаты алюминия (типа варисцита, ваввелита и др.) составили 8–12% от общего содержания минеральных фосфатов. Характер распределения фракций фосфатов в почве под различными фитоценозами имел свои особенности. В почве под естественными фитоценозами, по сравнению с агрофитоценозами, отмечено более высокое содержание Fe–Р и более низкое содержание наиболее доступных для растений фракций – рыхлосвязанных и разноосновных фосфатов кальция. Минимальное количество фосфатов железа наблюдали при длительном использовании пашни (полевой севооборот, без удобрений), содержание фосфатов железа было в 1.6–1.8 раза меньше, чем под лесом и лугом. При сравнении с естественными фитоценозами длительное возделывание сельскохозяйственных культур в полевом севообороте привело к увеличению в почве рыхлосвязанных (Са–Р_I) в 1.4–2.0 раза и разноосновных фосфатов кальция (Са–Р_{II}) в 1.3 раза.

Остаточный фосфор удобрения (расчеты проведены разностным методом по сравнению с контрольным вариантом) закрепился в виде фосфатов железа (48%), подвижных рыхлосвязанных (31%) и разноосновных фосфатов кальция (13%). Под злаково-разнотравным лугом наблюдали самое высокое содержание труднорастворимых высокоосновных фосфатов кальция типа апатита Са–Р_{III}.

Об особенностях фосфатного режима почв можно судить по соотношению суммы фосфатов кальция Са–Р_I + Са–Р_{II} и суммы фосфатов полуторных оксидов (Al–Р + Fe–Р). Чем выше эта величина, тем доступнее фосфор растениям ([Ubugunov et al., 2015](#)). По нашим данным, величина этого соотношения в почве под смешан-

ным лесом и злаково-разнотравным лугом составила 0.28–0.30, под козлятником восточным – 0.45.

Максимальные значения соотношения (0.60–0.64) получены в пахотной почве полевого севооборота как в вариантах без применения удобрений, так и с внесением $N_{60}P_{60}K_{60}$.

Установлена достоверная средняя и высокая прямая корреляционная связь фосфатов кальция и алюминия с кислотностью почвы ($r = 0.5–0.8$), с суммой обменных оснований ($r = 0.4–0.8$), обратная средняя и высокая корреляционная зависимость с содержанием органического углерода ($r = -0.6–0.9$). Между фосфатами железа и содержанием органического углерода наблюдали прямую среднюю корреляционную связь ($r = 0.6$) и обратную высокую – с кислотностью почвы ($r = -0.75$).

Содержание подвижных соединений фосфора в почве под смешанным лесом составило 168 мг/кг, их запасы в верхнем горизонте почвы – 0.4 т/га (рис. 5). В почве злаково-разнотравного луга количество подвижных соединений фосфора и их запасы были почти в два раза выше. Полученные результаты в первую очередь связаны с различным химическим составом и количеством надземной массы и корневых остатков, поступающих ежегодно в почву.

Под козлятником восточным и в контрольном варианте длительного стационарного опыта содержание подвижных соединений фосфора находилось на одном уровне (160–188 мг/кг), т. е. обеспеченность почвы подвижными соединениями фосфора для культур сплошного сева – высокая (150–250 мг/кг). Запасы составили 0.4–0.5 т/га.

Наблюдение за динамикой содержания подвижных соединений фосфора в длительном стационарном опыте по ротациям (рис. 6) показало, что продолжительное возделывание сельскохозяйственных культур в полевом восьмипольном севообороте (контрольный вариант) привело к постепенному снижению содержания подвижных форм фосфора в почве от момента закладки опыта к пятой ротации с 239 до 164 мг/кг.

Внесение удобрений в первую очередь увеличивает содержание подвижных форм фосфора в почве, а также увеличивает их подвижность ([Минеев и др., 2005](#)).

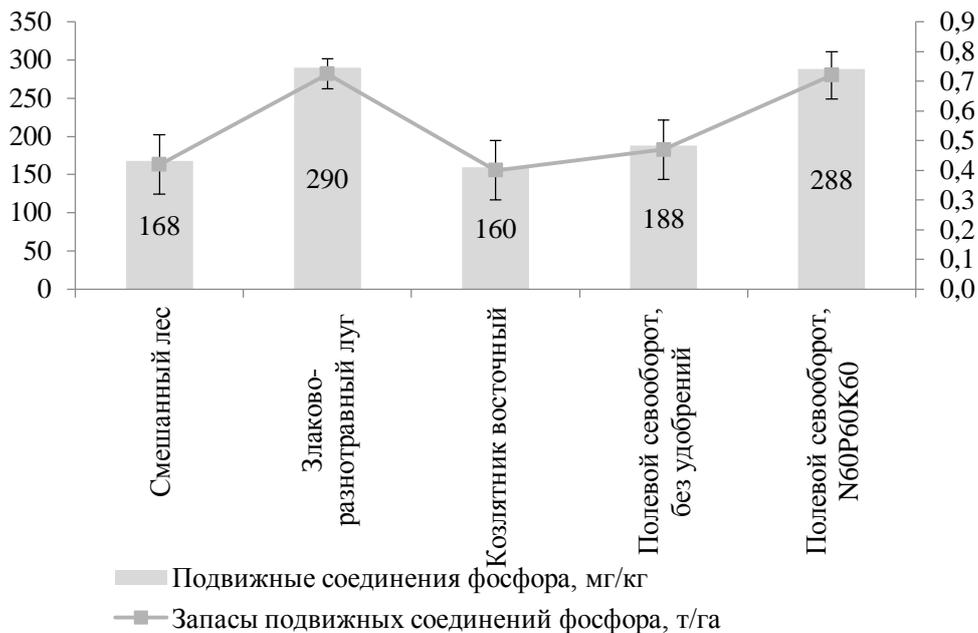


Рис. 5. Содержание подвижных соединений фосфора и их запасы в дерново-подзолистой почве под естественными фитоценозами и агрофитоценозами.

Fig. 5. Content of plant available phosphorus forms and their reserves in sod-podzolic soil under natural phytocenoses and agrophytocenoses.

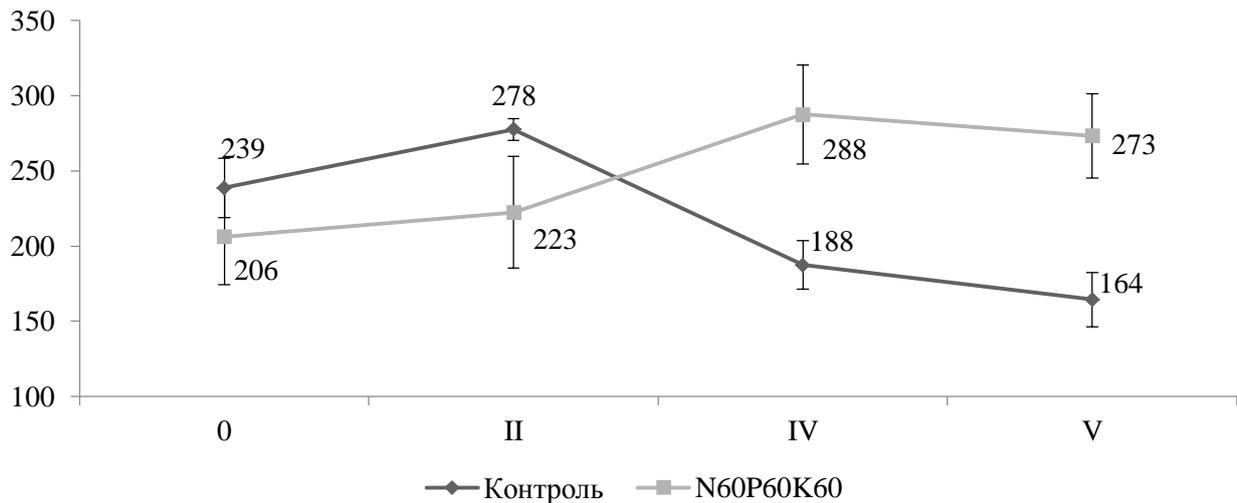


Рис. 6. Динамика содержания подвижных соединений фосфора в длительном стационарном опыте по ротациям (1978–2017 гг.).

Fig. 6. Dynamics of plant available phosphorus content in the long-term stationary experiment by rotations (1978–2017).

В первых ротациях севооборота содержание подвижных соединений фосфора в почве при внесении $N_{60}P_{60}K_{60}$ находилось на уровне контрольного варианта, к IV–V ротациям наблюдали увеличение содержания подвижных соединений фосфора в 1.5–1.7 раза, запасы в пахотном горизонте почвы увеличились до 0.7 т/га. Можно отметить, что относительное возрастание содержания подвижных форм элемента, по сравнению с увеличением общего содержания, гораздо более существенно.

Установлена достоверная высокая прямая корреляционная связь подвижных соединений фосфора с суммой обменных оснований и с содержанием обменного кальция в почве ($r = 0.8$) и слабая – с показателем pH_{KCl} ($= 0.3$).

Наиболее существенные процессы трансформации и поглощения фосфатов происходят с участием почвенного раствора, в который переходят наиболее подвижные, растворимые формы фосфатов. В почвенном растворе присутствует лишь малая часть фосфора, содержащегося в почве. Степень подвижности фосфатов (концентрация фосфат-ионов, находящихся в почвенном растворе) дерново-подзолистой почвы естественных фитоценозов и под козлятником восточным составила 1.6–1.7 мг/л. В почве контрольного варианта длительного опыта степень подвижности фосфатов была почти в 3 раза ниже (0.6 мг/л), что, возможно, связано с интенсивным потреблением фосфат-ионов из почвенного раствора сельскохозяйственными культурами. Применение минеральных удобрений обеспечило увеличение степени подвижности фосфатов до 1.4 мг/л. Корреляционной связи между содержанием подвижных соединений фосфора (по Кирсанову) и степенью подвижности фосфатов не выявлено. Отмечена прямая высокая корреляционная зависимость между степенью подвижности фосфатов и содержанием органического вещества в почве ($r = 0.75$).

Для более полной характеристики подвижных соединений фосфора в почве провели извлечение фосфора при разных величинах pH вытяжки по методике Е.В. Бобко, А.Л. Масловой (табл. 2).

Результаты исследований показали существенное увеличение содержания фосфора в растворах с повышением количества HCl , что свидетельствует о потенциальной растворимости природных фосфатов и, соответственно, о доступности их для пита-

ния растений. Максимально высокая растворимость фосфатов отмечена в контрольном варианте длительного опыта, что согласуется с результатами фракционного состава фосфатов по Гинзбург-Лебедевой.

Таблица 2. Растворимость фосфатов дерново-подзолистой почвы различных фитоценозов, мг $P_2O_5/100$ г почвы

Table 2. Phosphates solubility in sod-podzolic soil of different phytocenoses, mg $P_2O_5/100$ g of soil

Объект исследования	Количество растворителя, мл 0.1 н НСІ					
	0	2	4	6	9	12
Смешанный лес	2.6	2.8	2.4	2.4	5.6	5.6
Злаково-разнотравный луг	2.8	2.8	2.8	6.0	10.0	10.0
Козлятник восточный	2.0	2.0	2.4	5.2	4.8	5.3
Полевой севооборот, без удобрений	7.5	6.5	7.0	8.0	9.0	10.0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Предуралья общее содержание фосфора в верхнем слое варьировало от 1 030 до 1 350 мг/кг. Доля минеральных соединений фосфора в почве под естественными фитоценозами (смешанный лес, злаково-разнотравный луг) была немного выше, чем органических. В составе минеральных фосфатов преобладали фосфаты железа. В почве злаково-разнотравного луга количество подвижных соединений фосфора и их запасы были почти в два раза выше, чем под лесом. Степень подвижности фосфатов дерново-подзолистой почвы естественных фитоценозов была примерно на одном уровне (1.6–1.7 мг/л).

Длительное возделывание сельскохозяйственных культур в течение пяти ротаций полевого восьмипольного севооборота (кон-

трольный вариант длительного опыта) привело к снижению в почве содержания органических соединений фосфора, их количество было в 1.7 раза ниже, чем в почве под лугом, и в 1.2 раза ниже, чем под лесом. На долю органических соединений фосфора в почве пришлось 35%, минеральных – 65%. Полученные результаты связаны с уменьшением в почве содержания органического вещества. В почве длительного стационарного опыта, по сравнению с естественными фитоценозами, отмечено более низкое содержание фосфатов железа и более высокое содержание наиболее доступных для растений рыхлосвязанных и разноосновных фосфатов кальция, что связано с трансформацией соединений фосфора в почве в результате сельскохозяйственного производства. Отмечено постепенное снижение содержания подвижных соединений фосфора в почве от момента закладки опыта к пятой ротации. Степень подвижности фосфатов была почти в 3 раза ниже, чем под лесом и лугом. Длительное внесение $N_{60}P_{60}K_{60}$ привело к существенному увеличению в почве минеральных и подвижных соединений фосфора. Остаточный фосфор удобрения закрепился в виде фосфатов железа и наиболее доступных для растений рыхлосвязанных и разноосновных фосфатов кальция. Под козлятником восточным значения содержания органических, минеральных и подвижных соединений фосфора, а также их соотношение оказались близкими к таковым в почвах под смешанным лесом и злаково-разнотравным лугом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматические ресурсы Пермской области / Под общей ред. Е.В. Григорчук. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 156 с.
2. Андрианов С.Н. Формирование фосфатного режима дерново-подзолистой почвы в разных системах удобрений. М.: ВНИИА, 2004. 296 с.
3. Балгабаев А.М., Елешев Р.Е., Умбетов А.К., Иванов А.Л., Рогова О.Б., Колобова Н.А. Запасы и групповой состав фосфатов почв предгорной зоны Илийского Алатау и их изменение при длительном использовании // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 124–158. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-124-158](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-124-158).
4. Волюнкина О.В. Баланс питательных веществ на посевах сельскохозяйственных культур // Плодородие. 2020. № 4. С. 13–16. DOI:

[10.25680/S19948603.2020.115.04](https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.115.04).

5. *Гинзбург К.Е.* Фосфор основных типов почв СССР. М.: Наука, 1981. 244 с.
6. *Гребенников А.М., Исаев В.А., Юдин С.А., Сапрыкин С.В., Чевердин Ю.И.* Влияние способов обработки почвы на запасы элементов питания в сегрегационных черноземах // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 6. С. 13–18. DOI: [10.30850/vrsn/2018/6/13-18](https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/6/13-18).
7. *Гулякин И.В., Чуприков Ю.К.* Влияние удобрений на фосфатный режим дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 1973. № 8. С. 15–23.
8. *Иванов А.Л., Сычев В.Г., Державин Л.М.* Агробиогеохимический цикл фосфора. М.: Типография Россельхозакадемии, 2012. 512 с.
9. *Кайгородов А.Т., Пискунова Н.И.* Современное состояние почвенного плодородия пахотных земель Пермского края // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 4. С. 22–26.
10. *Косолапова А.И., Завьялова Н.Е., Митрофанова Е.М., Васбиева М.Т., Ямалтдинова В.Р., Фомин Д.С., Тетерлев И.С.* Эффективность длительного применения удобрений на дерново-подзолистых почвах Предуралья // Агрохимия. 2018. № 2. С. 42–55. DOI: [10.7868/S0002188118020047](https://doi.org/10.7868/S0002188118020047).
11. *Красницкий В.М., Шмидт А.Г., Матвейчик О.А., Бобренко И.А.* Динамика подвижного фосфора в почвах лесостепи Западной Сибири // Плодородие. 2020. № 2. С. 57–60. DOI: [10.25680/S19948603.2020.113.17](https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.113.17).
12. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф.* Действие и последствие удобрений на плодородие дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы // Агрохимия. 2005. № 1. С. 5–13.
13. *Митрофанова Е.М.* Влияние длительного применения минеральных удобрений и последствие извести на фосфатный режим дерново-поверхностно-подзолистой почвы Предуралья // Агрохимия. 2017. № 7. С. 36–43.
14. *Степанов А.Ф., Христоч В.В., Александрова С.Н.* Козлятник восточный: биология, возделывание, использование. Омск: Изд-во ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2017. 420 с.
15. *Сычев В.Г., Кирпичников Н.А.* Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях. М.: ВНИИА, 2009. 176 с.
16. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б.* Плодородие почв России и пути его регулирования // Агрохимия. 2020. № 6. С. 3–13. DOI: [10.31857/S0002188120060125](https://doi.org/10.31857/S0002188120060125).
17. *Титова В.И., Шафронов О.Д., Варламова Л.Д.* Фосфор в земледелии Нижегородской области. Н. Новгород: Изд-во ВВАГС, 2005. 219 с.
18. *Цветнов Е.В., Цветнова О.Б., Макаров О.А., Марахова Н.А.*

Проблемы оценки нейтрального баланса деградации земель на уровне региона Российской Федерации // Земледелие. 2020. № 2. С. 3–6. DOI: [10.24411/0044-3913-2020-10201](https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10201).

19. *Fresne M., Jordan P., Fenton O., Mellander P.E., Daly K.* Soil chemical and fertilizer influences on soluble and medium-sized colloidal phosphorus in agricultural soils // Science of the total environment. 2021. Vol. 754. No. 142112. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.142112](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142112).

20. *Jonczak J., Simansky V., Pollakova N.* Content and profile distribution of phosphorus fractions in arable and forest Cambic Chernozems // Sylwan. 2015. Vol. 159. No. 11. P. 931–939.

21. *Li C.L., Zhang P., Zhang J.J., Zhu P., Wang L.C.* Forms, transformations and availability of phosphorus after 32 years of manure and mineral fertilization in a Mollisol under continuous maize cropping // Archives of agronomy and soil science. 2020. DOI: [10.1080/03650340.2020.1787385](https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1787385).

22. *Ubugunov L.L., Merkusheva M.G., Enkhtuyaa B.* The content of available mineral phosphorus compounds in chestnut soils of Northern Mongolia upon application of different forms of phosphorite // Eurasian Soil Science. 2015. Vol. 48. No. 6. P. 634–642. DOI: [10.1134/S1064229315060113](https://doi.org/10.1134/S1064229315060113).

23. *Zav'yalova N.E.* Humus and nitrogen in soddy-podzolic soils of different agricultural lands in Perm Region // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49. No. 11. P. 1269–1275. DOI: [10.1134/S1064229316110119](https://doi.org/10.1134/S1064229316110119).

REFERENCES

1. *Agroklimaticheskie resursy Permskoi oblasti* (Agroclimatic resources of the Perm region), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 156 p.
2. *Andrianov S.N., Formirovanie fosfatnogo rezhima dernovo-podzolistoi pochvy v raznykh sistemakh udobrenii* (Formation of the phosphate regime of sod-podzolic soil in different fertilization systems), Moscow: VNIIA, 2004, 296 p.
3. *Balgabaev A.M., Eleshev R.E., Umbetov A.K., Ivanov A.L., Rogova O.B., Kolobova N.A.*, Stocks and fraction composition of phosphorus in the Ili Alatau foothill soils and their change under long-term use, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101. pp. 124–158, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-124-158](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-124-158).
4. *Volynkina O.V.*, Balans pitatel'nykh veshchestv na posevakh sel'skokhozyaistvennykh kul'tur (Balance of nutrients in agricultural crops), *Plodorodie*, 2020, No. 4, pp. 13–16, DOI: [10.25680/S19948603.2020.115.04](https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.115.04).
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. Grebennikov A.M., Isaev V.A., Yudin S.A., Saprykin S.V., Cheverdin Yu.I., Influence of tillage on stocks of nutrients in segregated chernozem, *Vestnik of the Russian agricultural science*, 2018, No. 6, pp. 13–18. DOI: [10.30850/vrsn/2018/6/13-18](https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/6/13-18).
7. Gulyakin I.V., Chuprikov Yu.K., Vliyanie udobrenii na fosfatnyi rezhim dernovo-podzolistoi pochvy (The effect of fertilizers on the phosphate regime of sod-podzolic soil), *Agrokhimiya*, 1973, No. 8, pp. 15–23.
8. Ivanov A.L., Sychev V.G., Derzhavin L.M., *Agrobiogeokhimicheskii tsikl fosfora* (Agrobiogeochemical cycle of phosphorus), Moscow: Tipografiya Rossel'khozakademii, 2012, 512 p.
9. Kaigorodov A.T., Piskunova N.I., Sovremennoe sostoyanie pochvennogo plodorodiya pakhotnykh zemel' Permskogo kraya (The current state of soil fertility of arable lands in the Perm region), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2017, Vol. 31, No. 4, pp. 22–26.
10. Kosolapova A.I., Zav'yalova N.E., Mitrofanova E.M., Vasbieva M.T., Yamaltdinova V.R., Fomin D.S., Teterlev I.S., Effektivnost' dlitel'nogo primeneniya udobrenii na dernovo-podzolistykh pochvakh Predural'ya (The effectiveness of long-term use of fertilizers on turf-podzolic soils of the Cis-Urals), *Agrokhimiya*, 2018, No. 2, pp. 42–55, DOI: [10.7868/S0002188118020047](https://doi.org/10.7868/S0002188118020047).
11. Krasnitskii V.M., Shmidt A.G., Matveichik O.A., Bobrenko I.A., Dinamika podvizhnogo fosfora v pochvakh lesostepi Zapadnoi Sibiri (Dynamics of mobile phosphorus in the soils of the forest-steppe of Western Siberia), *Plodorodie*, 2020, No. 2, pp. 57–60, DOI: [10.25680/S19948603.2020.113.17](https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.113.17).
12. Mineev V.G., Gomonova N.F., Deistvie i posledestvie udobrenii na plodorodie dernovo-podzolistoi srednesuglinistoi pochvy (Effect and aftereffect of fertilizers on the fertility of sod-podzolic medium loamy soil), *Agrokhimiya*, 2005, No. 1, pp. 5–13.
13. Mitrofanova E.M., Vliyanie dlitel'nogo primeneniya mineral'nykh udobrenii i posledestviya izvesti na fosfatnyi rezhim dernovo-poverkhnostnopodzolistoi pochvy Predural'ya (The influence of long-term use of mineral fertilizers and the aftereffect of lime on the phosphate regime of sod-surface podzolic soil in the Urals), *Agrokhimiya*, 2017, No. 7, pp. 36–43.
14. Stepanov A.F., Khristich V.V., Aleksandrova S.N., *Kozlyatnik vostochnyi: biologiya, vozdeleyvanie, ispol'zovanie* (Eastern galega: biology, cultivation, use), Omsk: FGBOU VO Omskii GAU, 2017, 420 p.
15. Sychev V.G., Kirpichnikov N.A., *Priemy optimizatsii fosfatnogo rezhima pochv v agrotekhnologiyakh* (Techniques for optimizing the phosphate regime of soils in agricultural technologies), Moscow, VNIIA, 2009, 176 p.

16. Sychev V.G., Shafran S.A., Vinogradova S.B., Plodorodie pochv Rossii i puti ego regulirovaniya (Soil fertility of Russia and ways of its regulation), *Agrokhimiya*, 2020, No. 6, pp. 3–13, DOI: [10.31857/S0002188120060125](https://doi.org/10.31857/S0002188120060125).
17. Titova V.I., Shafronov O.D., Varlamova L.D., *Fosfor v zemledelii Nizhegorodskoi oblasti* (Phosphorus in agriculture of the Nizhny Novgorod region), Nizhny Novgorod: Izd-vo VVAGS, 2005, 219 p.
18. Tsvetnov E.V., Tsvetnova O.B., Makarov O.A., Marakhova N.A., Problemy otsenki neutral'nogo balansa degradatsii zemel' na urovne regiona Rossiiskoi Federatsii (Problems of assessing the neutral balance of land degradation at the regional level of the Russian Federation), *Zemledelie*, 2020, No. 2, pp. 3–6. DOI: [10.24411/0044-3913-2020-10201](https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10201).
19. Fresne M., Jordan P., Fenton O., Mellander P.E., Daly K., Soil chemical and fertilizer influences on soluble and medium-sized colloidal phosphorus in agricultural soils, *Science Of The Total Environment*, 2021, Vol. 754, No. 142112, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.142112](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142112).
20. Jonczak J., Simansky V., Pollakova N., Content and profile distribution of phosphorus fractions in arable and forest Cambic Chernozems, *Sylwan*, 2015, Vol. 159, No. 11, pp. 931–939.
21. Li C.L., Zhang P., Zhang J.J., Zhu P., Wang L.C., Forms, transformations and availability of phosphorus after 32 years of manure and mineral fertilization in a Mollisol under continuous maize cropping, *Archives of agronomy and soil science*, 2020, DOI: [10.1080/03650340.2020.1787385](https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1787385).
22. Ubugunov L.L., Merkusheva M.G., Enkhtuyaa B., The content of available mineral phosphorus compounds in chestnut soils of Northern Mongolia upon application of different forms of phosphorite, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 6, pp. 634–642, DOI: [10.1134/S1064229315060113](https://doi.org/10.1134/S1064229315060113).
23. Zav'yalova N.E., Humus and nitrogen in soddy-podzolic soils of different agricultural lands in Perm Region, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, No. 11, pp. 1269–1275, DOI: [10.1134/S1064229316110119](https://doi.org/10.1134/S1064229316110119).