



DOI: 10.26898/0370-8799-2019-3-1

УДК: 631.46: 631.85

ОПТИМАЛЬНЫЕ ДОЗЫ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ (К ПОЧВЕННО-БИОХИМИЧЕСКИМ АСПЕКТАМ ПРОБЛЕМЫ)

Данилова А.А.

*Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий Российской академии наук
Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия*

Для цитирования: Данилова А.А. Оптимальные дозы фосфорных удобрений (к почвенно-биохимическим аспектам проблемы) // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2019. Т. 49. № 3. С. 5–15. DOI: 10.26898/0370-8799-2019-3-1

For citation: Danilova A.A. Optimal'nye dozy fosfornykh udobrenii (k pochvenno-biokhimicheskim aspektam problem) [Optimal doses of phosphorous fertilizers (soil biochemical aspects of the problem)]. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* [Siberian Herald of Agricultural Science], 2019, vol. 49, no. 3, pp. 5–15. DOI: 10.26898/0370-8799-2019-3-1

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

В настоящее время проблема обеспечения фосфором почв Сибири значительно обострилась в сравнении с прошедшими десятилетиями. Это связано с практически полным прекращением применения фосфорных удобрений под зерновые культуры и резким удорожанием данных удобрений в сравнении с ценой зерна. Известны разные подходы к диагностике пула доступного растениям фосфора. В том числе предложены методы на основе применения препаратов фосфатаз, позволяющие оценивать подвижность фосфорорганических соединений в почве. Проведена оценка содержания ферментативно доступного фосфора в черноземе выщелоченном Приобья в зависимости от вида севооборота и применения фосфорных удобрений для обоснования их оптимальных доз. После пяти ротаций трехпольного зернопарового севооборота фракция ферментативно доступного фосфора в почве не обнаружена на агрофонах без удобрений и при внесении относительно низких доз фосфора (P_{15}). Некоторый запас его в почве отмечен при ежегодном внесении P_{60} на фоне зернотравяного севооборота и длительном

OPTIMAL DOSES OF PHOSPHOROUS FERTILIZERS (SOIL BIOCHEMICAL ASPECTS OF THE PROBLEM)

Danilova A.A.

*Siberian Federal Scientific Centre
of Agro-BioTechnologies
of the Russian Academy of Sciences
Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia*

At present, the problem of supplying soils of Siberia with phosphorus has become much more acute in comparison with the past decades. This is due to virtually complete termination of the use of phosphate fertilizers for grain crops and a sharp increase in the price of these fertilizers compared to the price of grain. There are various approaches to diagnosing the pool of phosphorus available to plants, including methods based on the use of phosphatase preparations allowing to assess the mobility of organic phosphorous compounds in the soil. The content of biologically available soil phosphorus was assessed in the leached chernozem of Priobye, depending on the type of crop rotation and the use of phosphate fertilizers, with the aim of finding optimal doses of these fertilizers. After five rotations of three-field grain-fallow crop rotations, the fraction of biologically available soil phosphorus was not detected against the background of no fertilizers or with application of low doses of phosphorus (P_{15}). A certain reserve of phosphorus in the soil was found with the annual use of P_{60} on the grain-grass crop rotation and long-term application of manure on the farm crop rotation. It was concluded that in the forest-steppe

применении навоза в прифермском севообороте. Сделан вывод, что в лесостепи Приобья при применении под зерновые культуры фосфорных удобрений в дозе P_{15} , которая в среднемноголетнем цикле лет с различными условиями увлажнения компенсирует ежегодный вынос элемента с зерном, обеспечение растений фосфором может происходить без образования запасов ферментативно доступного фосфора. Ежегодное применение P_{60} способствует формированию запасов невостребованного фосфора в виде ферментативно доступной его фракции, что делает спорной экономическую целесообразность данной дозы удобрения.

Ключевые слова: фосфатазная активность почвы, ферментативно доступный фосфор почвы, севообороты, фосфорные удобрения, чернозем выщелоченный

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования органических соединений фосфора в почве связана, как минимум, с двумя позициями. Во-первых, фосфорорганические соединения составляют значительную (до 50–70% от общего содержания элемента) часть потенциально доступного растениям пула фосфора в почве [1]. Во-вторых, в последние годы осознается обострение новой экологической проблемы, связанной с последствиями применения в развитых странах мира высоких доз фосфорных удобрений «в запас». Оказалось, что за прошедшие годы значительная часть минерального фосфора из удобрений перешла в органическую, которая легко минерализуется и становится значимой причиной массовой эвтрофикации водоемов [2–4].

Для почв Сибири наиболее значим первый из указанных моментов, тесно связанный с определением экономически приемлемой дозы фосфорных удобрений. Ранее проведены обширные исследования по данной проблеме [5, 6]. Основное внимание в этих работах уделялось минеральным соединениям фосфора.

Как известно, высвобождение фосфора из его органических соединений происходит при воздействии ферментов микробного и растительного происхождения. Для успешного прохождения этого процесса в

of Priobye, the supply of plants with phosphorus can occur without the formation of biologically available soil phosphorus reserves, whereby the dose of phosphate fertilizer P_{15} compensates for the annual removal of the element with grain in the average multiyear cycle of years with different climate conditions. Annual application of P_{60} forms reserves of surplus phosphorus in the form of its biologically available fraction, which makes the economic efficiency of this doze of the fertilizer questionable.

Keywords: soil phosphatase activity, biologically available soil phosphorus, crop rotations, phosphate fertilizers, leached chernozem

почвенной среде должны присутствовать и фермент, и подходящий субстрат. Соответственно, о состоянии органических соединений фосфора (ОСФ) в почве можно судить как по наличию фермента, так и по состоянию субстрата. Для оценки наличия того или иного фермента (ферментативная активность) в почву вносят специфические субстраты и оценивают уровень активности имеющегося в почве фермента, т.е. изучают потенциальные возможности почвы к гидролизу ОСФ. Другой подход связан с оценкой наличия специфического субстрата для активации фермента. Для этого в почву вносят препараты ферментов, выделенных из растительных и микробных клеток, т.е. в этом блоке исследований изучают состояние субстрата, имеющегося в почве.

Ферментативную активность почвы достаточно широко изучают во всем мире. Данный показатель давно принят как один из критериев плодородия почвы [7]. Исследований по оценке специфического субстрата для активации фермента значительно меньше. Это связано прежде всего с проблемами методического характера. В данной области исследований в качестве продукта ферментативной реакции учитывают количество образовавшегося минерального фосфора, который быстро фиксируется в твердой фазе почвы, поэтому количественно оценить его

высвобождение достаточно сложно. Многие авторы изучали количество ферментативно доступного фосфора (ФДФ) в различных вытяжках из почвы: в водной [8, 9], цитратной [10], в вытяжке по Олсену [11]. В 2015 г. DeLuca с соавт. [12] предложили способ оценки ферментативно доступного фосфора путем прямой инкубации навесок почвы с ферментом. В данном способе определяют количество минерального фосфора, который может выделиться из ОСФ под воздействием фосфатазы. С агрохимической точки зрения последний подход может быть более информативным в сравнении с указанными выше, так как позволяет оценить запас ближайшего резерва биологически доступного фосфора в почве.

Цель исследования – определить количество минерального фосфора, высвобождаемого из органических соединений, под воздействием фермента фосфатазы в черноземе выщелоченном Приобья на агрофонах с различным уровнем поступления растительных остатков и внесения удобрений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в 2017–2018 гг. в стационарных полевых опытах СибНИИЗиХ СФНЦА РАН в окрестностях Новосибирска. Задействованы шесть севооборотов: четыре трехпольных зернопаровых, двухпольный зерновой, четырехпольный зернопаровой. Варианты опытов в севооборотах существенно различались по уровню внесения минеральных (в том числе и фосфорных) удобрений. Трехпольные зернопаровые севообороты различались набором культур и количеством поступающих в почву растительных остатков. В первом севообороте (чистый пар – пшеница – пшеница) солому удаляли с полей, стерню сжигали, во втором (чистый пар – пшеница – пшеница) – солому измельчали и рассеивали по полю, в третьем (викоовес на зеленую массу – пшеница – пшеница) – зеленую массу викоовса удаляли с поля, а солому также измельчали и рассеивали по полю, в четвертом (викоовес на сидерат – пшеница – пшеница) – биомассу викоовса и солому пшеницы заделывали

в почву. В каждом севообороте было три уровня удобрённости: 1) У0 – без применения удобрений; 2) У1 ($N_{13}P_{15}$); 3) У2 ($N_{40}P_{15}$ на 1 га севооборотной площади). Азотные удобрения вносили под предпосевную культивацию, фосфорные – в запас в паровом поле (или под викоовес) в дозе 45 кг P_2O_5 /га. В севообороте пшеница – ячмень удобрения под пшеницу и ячмень вносили ежегодно под предпосевную культивацию в дозах N_{0} , N_{30} , N_{60} , N_{90} . Культуры севооборотов возделывали на интенсивном фоне, т.е. при одинаковом использовании гербицидов, инсектицидов и фунгицидов. Зяблевая обработка почвы – вспашка на глубину 25–27 см.

Образцы почвы отбирали также в зернотравяном севообороте клевер – озимая рожь – пшеница – ячмень, где ежегодно вносили фосфорные удобрения в дозе P_{60} . Также исследованы образцы почв, отобранные на производственных полях на территории ЗАО «Ирмень» (Новосибирская область), куда ежегодно вносили высокие дозы навоза (прифермские севообороты). Фосфатазную активность почвы определяли по Галстяну [13]. В качестве субстрата для гидролиза использовали фенофталеин фосфат натрия. Количество ФДФ определяли по прописи DeLuca с соавт. [12]. Для анализа использовали препарат кислой фосфатазы, выделенной из зародыша пшеницы (Sigma P3627; ECN 232-630-9). Подробная характеристика коммерческих препаратов кислых фосфатаз приведена в обзоре [14]. Кратко процедура анализа заключалась в следующем. Навеску свежей почвы заливали раствором фермента (0,02 э.е/мл) в ацетатном буфере (60 mM, pH 6,5), в качестве контроля такие же пробы ставили с буфером без фермента. Суспензии инкубировали 3 ч при температуре 30 °С в условиях непрерывного перемешивания. После инкубации суспензии центрифугировали и определяли содержание P_2O_5 с использованием реактива малахитового зеленого. Во втором этапе исследований для активации органического вещества образцы почвы подвергли регидратации по прописи Благодатского и др. [15]: почву нагревали 24 ч при температуре 65 °С. Далее все про-

цедуры анализа были выполнены по прописи DeLuca с соавт. [12].

Почва – старопашотный чернозем выщелоченный среднегумусный среднесуглинистый с содержанием минерального фосфора по Чирикову 200–250, по Карпинскому – Замятиной – 0,36–0,68 мг P₂O₅/кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Состояние органического вещества в исследуемой почве после пяти ротаций трехпольных зернопаровых севооборотов представлено в табл. 1.

Наиболее значимые различия между вариантами опыта отмечены по содержанию углерода мортмассы – наиболее мобильной части почвенного органического вещества (ПОВ). В аспекте нашего исследования значимость данной фракции ПОВ связана, в частности, с тем, что она может быть источником фосфорорганических соединений и активатором почвенной микробиоты – важнейшего источника ферментов. Как и следовало ожидать, увеличение количества поступающего растительного вещества способствовало повышению показателей биологической активности почвы. При этом вклад факторов «вариант» (количество растительных остатков) и «удобренность» в вариации признаков были неоднозначными. Так, фактор «вариант» имел решающее значение в динамике углерода микробной биомассы, числа КОЕ микроорганизмов, утилизирующих минеральные источники азота (среда КАА) и протеазной активности. Удобрения преимущественно влияли на динамику КОЕ сапротрофных мик-

роорганизмов, нитрифицирующих автотрофов, разложения целлюлозы.

Динамика фосфатазной активности почвы представлена на рис. 1. На фоне без удобрений показатель слабо зависел от варианта опыта, т.е. поступление фермента в почву практически не зависело от содержания органического вещества в почве. На удобренном фоне фосфатазная активность почвы была ниже, чем на неудобренном. Степень снижения показателя составила ряд 75–40–25–10% соответственно в ряду вариантов удаление соломы – оставление соломы – занятый пар – сидеральный пар.

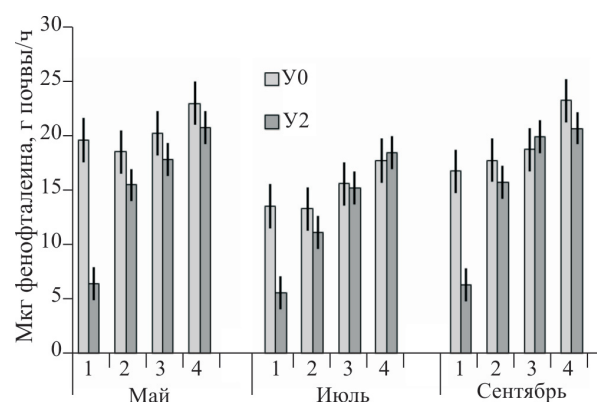


Рис. 1. Фосфатазная активность чернозема выщелоченного по вариантам опыта:

1 – удаление соломы с поля + чистый пар; 2 – оставление соломы на поле + чистый пар; 3 – оставление соломы на поле + занятый пар; 4 – оставление соломы на поле + сидеральный пар. Вертикальными линиями показан доверительный интервал при $p_{0.05}$

Fig. 1. Phosphatase activity of leached chernozem by the variants of the experiment:

1 – removal of straw from the field + bare fallow; 2 – leaving straw on the field + bare fallow; 3 – leaving straw on the field + cropped fallow; 4 – leaving straw on the field + green manure fallow. Vertical lines show confidence interval at $p_{0.05}$

Табл. 1. Содержание фракций органического вещества в черноземе выщелоченном после трех ротаций трехпольных зернопаровых севооборотов в среднем по фонам У0 и У2 [16]

Table 1. The content of organic matter fractions in leached chernozem after three rotations of three-field grain-fallow crop rotations (on average, variants У0 and У2) [16]

Вариант полевого опыта	В среднем по вариантам У0 и У2		
	Поступление растительных остатков, т С/га в год	С _{общ} , %	С _{морт} , мг/кг
Удаление соломы с поля + чистый пар	0,99	3,56	440
Оставление соломы на поле + чистый пар	2,57	3,66	690
Оставление соломы на поле + занятый пар	3,01	3,71	880
Оставление соломы на поле + сидеральный пар	3,80	3,79	1040
НСР ₀₅		0,36	140

Этот факт может быть объяснен при помощи известных в литературе сведений об ингибировании активности почвенных фосфатаз при внесении фосфорных удобрений. Очевидно, что степень данного ингибирования была более выраженной в варианте удаления соломы, где относительно низкое содержание мортмассы приводило к снижению важнейших показателей биологической активности почвы. Таким образом, на фонах без удобрения поступление фермента фосфатазы в почву не зависело от содержания ПОВ. Внесение фосфорного удобрения подавляло активность фермента, и величина ингибирования была обратно пропорциональной содержанию ПОВ. Обеднение почвы мортмассой может привести к снижению устойчивости процесса снабжения растений фосфором как за счет снижения поступления фермента в среду, так и снижения запасов субстрата, важным источником которого являются растительные остатки.

На следующем этапе исследований мы попытались определить наличие в почве субстрата, доступного для ферментативного гидролиза. Содержание субстрата оценивали косвенно по количеству минерального фосфора, выделяющегося при инкубации почвы с ферментом. Количественно этот показатель представляет собой разность между содержанием P_2O_5 в опыте (буфер + фермент) и контролем (буфер). В условиях зернопарового севооборота органических соединений фосфора, доступных для гидролиза

фосфатазой, не обнаружили (см. табл. 2), что может быть связано как быстрой минерализацией образующихся ОСФ, так и консервативностью ПОВ старопахотной почвы. Существуют приемы для некоторой активации последнего. Наиболее известным из них является цикл сушки и увлажнения почвы – регидратация. В результате данной процедуры содержание подвижной фракции ПОВ, учитываемой в солевой вытяжке, повысилось до 10 раз (см. табл. 3). Принято считать, что данная фракция наряду с ПОВ включает содержимое клеток, разрушившихся в цикле сушки – увлажнения. Следовательно, можно ожидать высвобождения дополнительных субстратов для ферментативного гидролиза.

После регидратации мы смогли учесть некоторое количество фосфора, выделяемое из почвы в результате воздействия фермента. Отметим тенденцию к повышению показателя на фоне сидерального пара в сравнении с севооборотами с чистым паром. При этом влияние фона удобренности не было очевидным. Однако, как показали наши исследования в условиях зернового севооборота, ежегодное внесение только азотных удобрений также может сопровождаться некоторым увеличением искомой фракции органического фосфора, что может быть связано с повышением содержания подвижной части ПОВ (см. табл. 4).

Итак, в зернопаровых и зерновых севооборотах при применении относительно низких доз фосфорных удобрений (P_{15}) фракция

Табл. 2. Расчет ферментативно доступного фосфора в почве, P_2O_5 , мкг/кг

Table 2. Calculation of biologically available phosphorus in soil, P_2O_5 , $\mu\text{g} / \text{kg}$

Вариант опыта	Буфер 50 мМ ацетатный рН 6,5	Буфер + фермент	Ферментативно доступный фосфор (ФДФ)
	А	В	В-А
У0			
Удаление соломы с поля + чистый пар	710	680	0*
Оставление соломы на поле + чистый пар	720	770	0
Оставление соломы на поле + сидеральный пар	920	1020	0
$N_{40}P_{15}$			
Удаление соломы с поля + чистый пар	630	600	0
Оставление соломы на поле + чистый пар	840	790	0
Оставление соломы на поле + сидеральный пар	1230	1300	0

Примечание. Различия между показателями, представленными в столбцах А и В, статистически недостоверны.

Табл. 3. Содержание ферментативно доступного фосфора в почве после регидратации P_2O_5 , мкг/кг (зернопаровой севооборот)

Table 3. The content of biologically available phosphorus in soil after rehydration P_2O_5 , $\mu\text{g} / \text{kg}$ (grain-fallow crop rotation)

Вариант опыта	С мг/кг (вытяжка 0,5 н K_2SO_4)		Количество P_2O_5 после регидратации, мкг/кг		ФДФ, мкг/кг
	Исходное содержание	После регидратации	Буфер	Буфер + фермент	
У0					
Удаление соломы с поля + чистый пар	18	180	650	820	200
Оставление соломы на поле + чистый пар	29	190	650	820	200
Оставление соломы на поле + сидеральный пар	8	320	1120	1410	300
$N_{40}P_{15}$					
Удаление соломы с поля + чистый пар	34	180	750	950	200
Оставление соломы на поле + чистый пар	35	260	750	950	200
Оставление соломы на поле + сидеральный пар	27	290	1470	1890	400

Табл. 4. Содержание ферментативно доступного фосфора в почве после регидратации, P_2O_5 , мкг/кг (зерновой севооборот пшеница – ячмень)

Table 4. The content of biologically available phosphorus in soil after rehydration, P_2O_5 , $\mu\text{g} / \text{kg}$ (wheat-barley grain crop rotation)

Вариант опыта	С мг/кг (вытяжка 0,5 н K_2SO_4)		Количество P_2O_5 после регидратации, мкг/кг		ФДФ, мкг/кг
	Исходное содержание	После регидратации	Буфер	Буфер + фермент	
N_0	37	166	300	400	100
N_{90}	47	193	300	500	200

органических соединений фосфора, доступная ферментативному гидролизу, за пять ротаций севооборотов не накопилась.

Накопление данной фракции отмечено в зернотравяном севообороте при длительном применении фосфорных удобрений в дозе P_{60} . При инкубации почвы с ферментом выделялось примерно 200 мкг P_2O_5 /кг (см. табл. 5). В почве с длительным внесением навоза данная величина достигала 1400 мкг P_2O_5 /кг.

Таким образом, инкубация свежей почвы с кислой фосфатазой, выделенной из зародыша пшеницы, не позволила выявить ферментативно доступные органические соединения фосфора в выщелоченном черноземе Приобья в агрофонах с относительно низким уровнем внесения фосфорных удобрений. При ежегодном внесении P_{60} в зернотравяном севообороте и внесении высоких доз навоза в прифермском севообороте обнаружили некоторый запас искомой фракции,

который может обеспечивать устойчивость снабжения растений фосфором. В целом, по результатам наших наблюдений, количество фосфора, которое может выделиться из старопашотного выщелоченного чернозема при ферментативном гидролизе органического вещества, составило 200–300 мкг P_2O_5 /кг, т.е. величина фракции близка показателям, получаемым методом определения легкодоступного для растений фосфора в почве по Карпинскому – Замятиной.

Для обсуждения полученных сведений сравним наши результаты с соответствующими показателями почв стран Европы. Как известно, в 70–80-е годы XX в. в развитых странах мира в почвы вносили большие дозы фосфорных удобрений «в запас», исходя из той точки зрения, что подвижность минеральных соединений фосфора в почве крайне низкая. Через несколько десятилетий выяснилось, что значимая часть внесенных минеральных соединений фосфора переходила

Табл. 5. Содержание ферментативно доступного фосфора в почве после регидратации, P_2O_5 , мкг/кг (зерно-травяной севооборот)

Table 5. The content of biologically available phosphorus in soil after rehydration, P_2O_5 , $\mu\text{g} / \text{kg}$ (grain-grass crop rotation)

Вариант опыта	Исходная пропись		После регидратации		ФДФ, мкг/кг	
	Буфер	Буфер + фермент	Буфер	Буфер + фермент	Исходная пропись	Регидратация
U_0						
Пар	620	690	1080	1320	0	200
Пшеница	900	1050	1040	1220	0	200
Клевер	970	1010	1710	2020	0	300
P_{60}						
Пар	1520	1910	1660	1970	400	300
Пшеница	1260	1550	1660	1960	300	300
Клевер	1160	1480	1410	1760	300	400
Доверительный интервал		70		70		

дит в органическую форму и заметно мигрирует в среде. На рис. 2 приведены сведения по балансу фосфора в почвах по некоторым регионам мира. Для исследуемой почвы сценарий очевидно сходен с таковым для Азии. В Западной Европе на протяжении многих лет доза вносимых фосфорных удобрений значительно превышала вынос элемента с

урожаем. Соответственно, как показали исследования DeLuca с соавт. (2015 г.), в этих почвах накопилась фракция биологически доступного фосфора, при ферментативном гидролизе которого выделялось 130–280 мг Р/кг почвы (примерно 400 мг P_2O_5 /кг), что на три порядка превышает показатели исследуемой почвы.

Таким образом, при существующей сис-

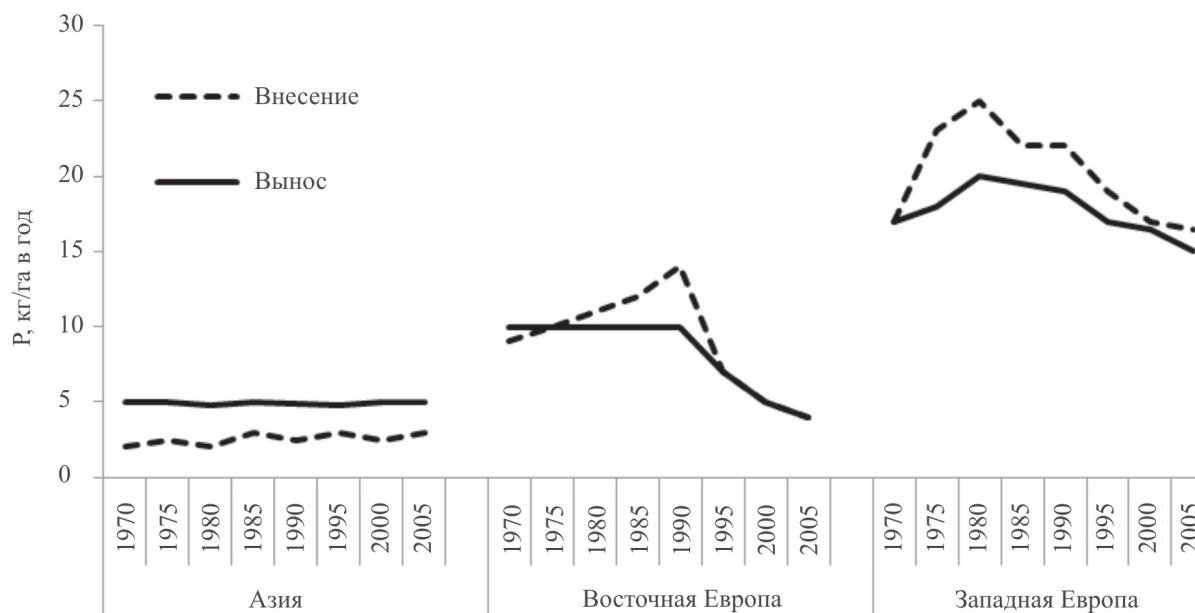


Рис. 2. Динамика внесения фосфора в почву с удобрениями и вынос его с урожаем по некоторым регионам мира за 1970–2005 гг. (по данным Sattari et al. [17]).

Примечание. Коэффициент пересчета Р в P_2O_5 равен 2,29.

Fig. 2. The dynamics of phosphorus introduction into soil with fertilizers and its removal with the harvest in some regions of the world for 1970–2005 (according to Sattari et al. [17]).

Note. Conversion coefficient of P into P_2O_5 equals 2.29.

теме применения фосфорных удобрений в выщелоченном черноземе Приобья иско- мую фракцию ферментативно доступного органического фосфора не обнаруживают или обнаруживают в количествах, существенно уступающих показателям почв на территории Европы, где в свое время вносили высокие дозы фосфора. Рассмотрим этот факт с точки зрения минерального питания зерновых культур в Приобье. В результате многолетних исследований на описываемых севооборотах установлено, что в благоприятные по погодным условиям годы даже на фонах без удобрений изучаемая почва в состоянии обеспечить вынос фосфора в количествах, достаточных для обеспечения урожайности зерна, равной примерно 6 т/га. В среднем за годы с разными условиями увлажнения бездефицитный баланс фосфора складывается при дозе P_{15} , которая компенсирует вынос элемента с урожаем¹. При данной дозе, как показали наши наблюдения, обеспечение растений фосфором идет без образования запасов ФДФ. При P_{60} ежегодно небольшой запас данной фракции обнаруживается, т.е. неустраиваемый фосфор откладывается в виде органических соединений, из которых фермент фосфатаза может высвободить минеральный фосфор. Наличие такого резерва важно для обеспечения устойчивости минерального питания растений. Однако с экономической точки зрения будет ли выгодно создавать этот запас при наличии возможности обеспечения растений фосфором при более низких дозах удобрения? Следовательно, в черноземе выщелоченном Приобья в условиях зерновых севооборотов доза фосфорного удобрения P_{15} , компенсирующая ежегодный вынос элемента с урожаем, является оптимальной.

ВЫВОДЫ

1. Фосфатазная активность чернозема выщелоченного Приобья в условиях зернопарового севооборота на неудобренном фоне не зависела от количества поступающих растительных остатков. Внесение P_{15} в сравнении с вариантом P_0 приводило к снижению показателя на 75–40–25–10% соответственно в ряду вариантов удаление соломы – оставление соломы – занятый пар – сидеральный пар.
2. Запас ферментативно доступного фосфора (ФДФ) не обнаружен в почве без применения фосфорного удобрения и при относительно низких его дозах (P_{15}).
3. Некоторый запас ФДФ в почве обнаружен при ежегодном внесении P_{60} и навоза в высоких дозах (прифермские севообороты).
4. Количество фосфора, которое может выделиться из старопашотного выщелоченного чернозема при ферментативном гидролизе органического вещества (ФДФ), составляло 200–300 мкг P_2O_5 /кг, т.е. величина фракции близка показателям, получаемым по методу Карпинского – Замятиной.
5. В лесостепи Приобья при применении под зерновые культуры фосфорных удобрений в дозе P_{15} , которая в среднемноголетнем цикле лет с различными условиями увлажнения компенсирует ежегодный вынос элемента с зерном, обеспечение растений фосфором может происходить без образования запасов ФДФ; ежегодное применение P_{60} способствует формированию запасов «неустраиваемого» фосфора в виде ФДФ, что делает спорной экономическую целесообразность данной дозы удобрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bünemann E.K.* Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic Phosphorus. A review // *Soil Biology & Biochemistry*. 2015. Vol. 89. P. 82–98. DOI: [org/10.1016/j.soilbio.2015.06.026](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.026)

¹Колбин С.А., Самохвалова Л.М., Прозоров А.С. Влияние условий увлажнения вегетационного периода на вынос фосфора яровой пшеницей в лесостепи Приобья // Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века: материалы Всерос. науч. конф., посвященной 110-летию Р.В. Ковалева. Новосибирск, 2018. С. 209.

2. *Dodd R.J., Sharpley A.N.* Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality // *Resources, Conservation and Recycling*. 2015. Vol. 105. P. 282–293. DOI: 10.1007/s10705-015-9726-1.
3. *Rowe H., Withers P.J.A., Baas P., Chan N.I., Doody D., Holiman J., Jacobs B., Li H., Turner B.L., McKelvie I.D., Haygarth P.M., MacDonal G.K., McDowell R., Sharpley A.N., Shen J., Taheri W., Wallenstein M., Weintraub M.N.* Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security // *Nutr Cycl Agroecosyst*. 2016. Vol. 104. P. 393–412. DOI: org/10.1016/j.resconrec.2015.10.001
4. *Moal M.L., Gascuel-Oudou C., Munesguen A., Souchon Y., Ytrillard C., Levain A., Moatar F., Pannard A., Philippe Souchu P., Lefebvre A., Gilles Pinay G.* Eutrophication: A new wine in an old bottle? // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 651. P. 1–11. DOI: org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139
5. *Берхин Ю.И., Чагина Е.Г.* Установление оптимального уровня содержания подвижного фосфора в почве и затраты удобрений для его достижения // *Агрохимия*. 1982. № 11. С. 49–55.
6. *Антипина Л.П., Пашкович Н.К., Малыгина Л.П.* Фосфор в почвенном покрове Западной Сибири // *Агрохимия*. 1988. № 5. С. 20–28.
7. *Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A.* Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions // *Soil Biology & Biochemistry*. 2013. Vol. 58. P. 216–234. DOI: org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009
8. *Turner B.L., McKelvie I.D., Haygarth P.M.* Characterisation of water-extractable soil organic phosphorus by phosphatase hydrolysis // *Soil Biology and Biochemistry*. 2002. Vol. 34. P. 27–35. PII:S0038-0717(01)00144-4
9. *Turner B.L., Cade-Menun B.J., Condon L.M., Susan Newman S.* Extraction of soil organic phosphorus // *Talanta*. 2005. Vol. 66. P. 294–306. DOI: 10.1016/j.talanta.2004.11.012
10. *Darch T., Blackwell M.S.A., Chadwick D., Haygarth P.M., Hawkins J.M.B., Turner B.L.* Assessment of bioavailable organic phosphorus in tropical forest soils by organic acid extraction and phosphatase hydrolysis // *Geoderma*. 2016. Vol. 284. P. 93–102. DOI: org/10.1016/j.geoderma.2016.08.018
11. *Sun D., Bi Q., Xu H., Li K., Liu X., Zhu J., Zhang Q., Jin C., Lu L., Lin X.* Degree of short-term drying before rewetting regulates the bicarbonate extractable and enzymatically hydrolyzable soil phosphorus fractions // *Geoderma*. 2017. Vol. 305. P. 136–143. DOI: org/10.1016/j.geoderma.2017.05.040
12. *DeLuca T.H., Glanville H.C., Harris M., Emmett B.A., Pingree M.R.A., de Sosa L.L., a-Moreno C.C., Jones D.L.* A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes // *Soil Biology & Biochemistry*. 2015. Vol. 88. P. 110–119. DOI: org/10.1016/j.soilbio.2015.05.016
13. *Методы почвенной микробиологии и биохимии*. М.: Издательство Московского государственного университета, 1980. 223 с.
14. *Tazisong I.A., Senwo Z.N., He Z.* Phosphatase Hydrolysis of Organic Phosphorus Compounds // *Advances in Enzyme Research*. 2015. Vol. 3. P. 39–51. DOI: org/10.4236/aer.2015.32005nms106961038
15. *Благодатский С.А., Благодатская Е.В., Горбенко А.Ю., Паников Н.С.* Регидратационный метод определения биомассы микроорганизмов в почве // *Почвоведение*. 1987. № 4. С. 64–71.
16. *Шарков И.Н., Колбин С.А., Прозоров А.С., Самохвалова Л.М.* Плодородие чернозема выщелоченного и урожайность яровой пшеницы при многолетнем удалении соломы с поля в лесостепи Западной Сибири // *Агрохимия*. 2016. № 11. С. 12–18.
17. *Sattari S.Z., Bouwman A.F., Martinez Rodríguez R., Beusen A.H.W., van Ittersum M.K.* Negative global phosphorus budgets challenge sustainable intensification of grasslands // *Nature communications*. 2016. DOI:10.1038.

REFERENCES

1. Bünemann E.K. Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic Phosphorus. A review. *Soil Biology & Biochemistry*. 2015, vol. 89, pp. 82–98. DOI: org/10.1016/j.soilbio.2015.06.026.
2. *Dodd R.J., Sharpley A.N.* Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality. *Resources, Conservation and*

- Recycling*. 2015, vol. 105, pp. 282–293. DOI: 10.1007/s10705-015-9726-1.
3. Rowe H., Withers P.J.A., Baas P., Chan N.I., Doody D., Holiman J., Jacobs B., Li H., Turner B. L., McKelvie I.D., Haygarth P.M. MacDonald G.K., McDowell R., Sharpley A.N., Shen J., Taheri W., Wallenstein M., Weintraub M.N. Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, vol. 104, pp. 393–412. DOI: org/10.1016/j.resconrec.2015.10.001.
 4. Moal M.L., Gascuel-Odoux C., Mynesguen A., Souchon Y., Ittrillard C., Levain A., Moatar F., Pannard A., Philippe Souchu P., Lefebvre A., Gilles Pinay G. Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 651, pp. 1–11. DOI: org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139.
 5. Berkhin YU.I., Chagina E.G. Ustanovlenie optimal'nogo urovnya sodержaniya podvizhnogo fosfora v pochve i zatraty udobrenij dlya ego dostizheniya [The establishment of the optimal level of mobile phosphorus in the soil and the cost of fertilizers to achieve it]. *Agrokimiya* [Agrochemistry]. 1982, no. 11, pp. 49–55. (In Russian).
 6. Antipina L.P., Pashkovich N.K., Malygina L.P. Fosfor v pochvennom pokrove Zapadnoj Sibiri [Phosphorus in the soil cover of Western Siberia]. *Agrokimiya* [Agrochemistry], 1988, no. 5, pp. 20–28. (In Russian).
 7. Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. *Soil Biology & Biochemistry*. 2013, vol. 58, pp. 216–234. DOI: org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009.
 8. Turner B.L., McKelvie I.D., Haygarth P.M. Characterization of water-extractable soil organic phosphorus by phosphatase hydrolysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, vol. 34, pp. 27–35. PII: S0038-0717(01)00144-4.
 9. Turner B.L., Cade-Menun B.J., Condrón L.M., Susan Newman S. Extraction of soil organic phosphorus. *Talanta*, 2005, vol. 66, pp. 294–306. DOI: 10.1016/j.talanta.2004.11.012.
 10. Darch T., Blackwell M.S.A., Chadwick D., Haygarth P.M., Hawkins J.M.B., Turner B.L. Assessment of bioavailable organic phosphorus in tropical forest soils by organic acid extraction and phosphatase hydrolysis. *Geoderma*, 2016, vol. 284, pp. 93–102. DOI: org/10.1016/j.geoderma.2016.08.018.
 11. Sun D., Bi Q., Xu H., Li K., Liu X., Zhu J., Zhang Q., Jin C., Lu L., Lin X. Degree of short-term drying before rewetting regulates the bicarbonate extractable and enzymatically hydrolyzable soil phosphorus fractions. *Geoderma*, 2017, vol. 305, pp. 136–143. DOI: org/10.1016/j.geoderma.2017.05.040
 12. DeLuca T.H., Glanville H.C., Harris M., Emmett B.A., Pingree M.R.A., de Sosa L.L., a-Moreno C.C., Jones D.L. A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, vol. 88, pp. 110–119. DOI: org/10.1016/j.soilbio.2015.05.016
 13. Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimiI. [Methods of soil microbiology and biochemistry]. M.: Izd-vo MGU [Moscow: MSU Publ.], 1980. 223 p.
 14. Tazisong I.A., Senwo Z.N., He Z. Phosphatase Hydrolysis of Organic Phosphorus Compounds. *Advances in Enzyme Research*. 2015, vol.3, pp. 39–51. DOI: org/journal/aerhttp://dx.doi.org/10.4236/aer.2015.32005nms106961038
 15. Blagodatskii S.A., Blagodatskaya E.V., Gorbenco A.YU., Panikov N.S. Regidratatsionnyi metod opredeleniya biomassy mikroorganizmov v pochve [Rehydration technique for microbial biomass determination in soil] *Pochvovedenie*. [Eurasian Soil Science]. 1987, no. 4, pp. 64–71. (In Russian).
 16. Sharkov I.N., Kolbin S.A., Prozorov A.S., Samokhvalova L.M. Plodorodie chernozema vshchelochennogo i urozhainost' yarovoi pshenitsy pri mnogoletnem udalenii solomy s polya v lesostepi Zapadnoi Sibiri [The fertility of leached chernozem and productivity of spring wheat under the long-term removal of straw from fields in the Western Siberia forest-steppe]. *Agrokimiya* [Agrochemistry]. 2016, no. 11, pp. 12–18. (In Russian).
 17. Sattari S.Z., Bouwman A.F., Martinez Rodríguez R., Beusen A.H.W., Van Ittersum M.K. Negative global phosphorus budgets challenge sustainable intensification of grasslands. *Nature communications*. 2016, 7: 10696 DOI: 10.1038.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

✉ Данилова А.А., доктор биологических наук, главный научный сотрудник; **адрес для переписки:** Россия, 630501 Новосибирская область, р.п. Краснообск, СФНЦА РАН, а/я 463; e-mail: Danilova7alb@yandex.ru

AUTHOR INFORMATION

✉ **Danilova A.A.** Doctor of Science in Biology, Head Researcher; **address:** PO Box 463, SFSCA RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia; e-mail: Danilova7alb@yandex.ru

Финансовая поддержка

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания ГЗ 0778-2018-0002.

Благодарность

Автор выражает искреннюю благодарность с.н.с. С.А. Колбину (СибНИИЗиХ), с.н.с. канд. биол. наук О.П. Якутиной (ИПА СО РАН) за ценные замечания в процессе подготовки рукописи к печати.

Дата поступления статьи 27.03.2019

Received by the editors 27.03.2019

