

## ФОСФАТНОЕ СОСТОЯНИЕ ЭРОДИРОВАННЫХ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2019 г. В. М. Назарюк<sup>1</sup>, Ф. Р. Калимуллина<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт почвоведения и агрохимии

630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 8/2, Россия

\*E-mail: flura.kalimullina@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.07.2018 г.

После доработки 26.11.2018 г.

Принята к публикации 12.03.2019 г.

Изучение фосфатного фонда полугидроморфных лугово-черноземных почв различной степени эродированности показало, что содержание форм фосфора зависело от специфики формирования гумусового горизонта и обогащенности почвообразующей породы этим элементом. В неэродированной почве в слое 0–20 см содержалась примерно половина фосфатов в органическом веществе и столько же в минеральной части, легкоподвижного фосфора – 1.2 мг/кг, подвижного и малоподвижного – 17 и 62 мг/100 г. По мере усиления эродированности почвы снижалась доля органического фосфора и возрастала – минерального. Эффективность фосфорных удобрений зависела прежде всего от погодных условий, эродированности почвы и содержания в ней подвижных фосфатов. Урожайность луговых трав за 4 года исследования на неэродированной почве при внесении P60 на фоне N60K60 возросла в среднем на 27, на среднеэродированной – на 15%.

**Ключевые слова:** фосфатное состояние, эродированные лугово-черноземные почвы, эффективность, фосфорные удобрения, Западная Сибирь.

**DOI:** 10.1134/S0002188119060097

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема фосфорного питания растений является одной из наиболее сложных в системе применения удобрений в агроценозах. Несмотря на то, что в экспериментальных исследованиях уделяется большое внимание разным направлениям [1–3], изученность данной проблемы в конкретных почвенно-климатических условиях остается неодинаковой. Лучше изучена система фосфорного питания на неэродированных автоморфных почвах [4, 5] и существенно меньше проведено исследований на эродированных почвах [6]. Возникающие трудности в решении данной проблемы связаны с разделением потоков фосфора, обусловленных использованием элемента из минеральной части почвы и органического вещества [7]. Для того чтобы лучше понять потоки формирования фосфатных пулов, необходимо знать содержание и запасы фосфора в минеральной форме и органической и, прежде всего, в пахотном и подпахотном слоях. Показано, что состояние фосфатного фонда почв и обеспеченность растений фосфором во многом зависит от

генезиса формирования почв [8], степени их эродированности [9], содержания фосфора в почвообразующих породах [10], системой применения удобрений [11]. Менее изученной остается проблема фосфорного питания растений на полугидроморфных эродированных лугово-черноземных почвах. Имеются лишь отдельные сведения о данной проблеме. В частности, показано, что при восстановлении плодородия выпашанных черноземно-луговых почв в природных экосистемах, где доминируют березово-осиновые леса в сочетании со злаковыми, осоковыми видами и разнотравьем, можно существенно повысить содержание и запасы валового фосфора в гумусовом горизонте почвы. Роль минеральных удобрений в улучшении фосфатного питания растений на черноземно-луговых почвах, особенно эродированных, остается до сих пор мало исследованной.

Цель работы – изучение состояния фосфатного фонда и эффективность фосфорных удобрений на эродированных лугово-черноземных почвах в фитоценозах луговых трав.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования проводили в Новосибирской обл. в Тогучинском р-не (территория Присалаирья, юго-восток Западно-Сибирской равнины). Объекты исследования – лугово-черноземные среднемощные тяжелосуглинистые почвы (пологий склон северо-восточной экспозиции) различной степени эродированности. Содержание общего гумуса и валового азота в лугово-черноземной неэродированной почве – соответственно 5.6 и 0.28%, слабоэродированной – 4.5 и 0.2, среднеэродированной – 3.4 и 0.19%, почва средне обеспечена подвижным фосфором. Содержание обменного калия в неэродированной почве составило 14.5, среднеэродированной – 15.6 мг/100 г. Величина  $pH_{KCl}$  находилась в пределах 5.3–5.5.

На почвах различной степени эродированности доминантными видами природных луговых трав обычно были кострец безостый (*Bromus inermis* L.), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), среди менее значимых трав встречались пырей ползучий (*Agropyron repens* L.), одуванчик обыкновенный (*Taraxacum vulgare* L.), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.), овсяница луговая (*Festuca pratense* Huds.) и хвощ полевой (*Equisetum arvense* L.).

Микрополевые опыты с луговыми травами проводили в природных экосистемах на делянках, обернутых полиэтиленовой пленкой на глубину пахотного слоя, общей площадью 1 м<sup>2</sup> и учетной 0.25 м<sup>2</sup>. Минеральные удобрения вносили в виде N<sub>м</sub>, P<sub>ст</sub> и K<sub>х</sub>. Для изучения сравнительной оценки эффективного плодородия антропогенно преобразованных почв отбирали образцы многолетних трав на одних и тех же площадках в трех-, четырехкратной повторности. Продуктивность растений определяли с помощью рамки размером 50 × 50 см в период укосной спелости.

В почвенных образцах определяли: гумус – по Тюрину, общий азот – по Кьельдалю с предварительным озолением образцов в смеси серной и хлорной кислот с восстановителем Кудеярова. Зольные питательные элементы в почве определяли на основе следующих методов: легкоподвижный фосфор – по Карпинскому и Замятиной, подвижный фосфор – по Чирикову, малоподвижный (нами предложенная форма фосфора) – в 1 н. HCl при отношении почвы к раствору 1 : 25, органический фосфор – по разности между его валовым и минеральным содержанием – по Хейфиц, валовой фосфор – по Гинзбург и др., обменный калий – по Масловой, нитратный азот – потенциометрическим способом с использованием

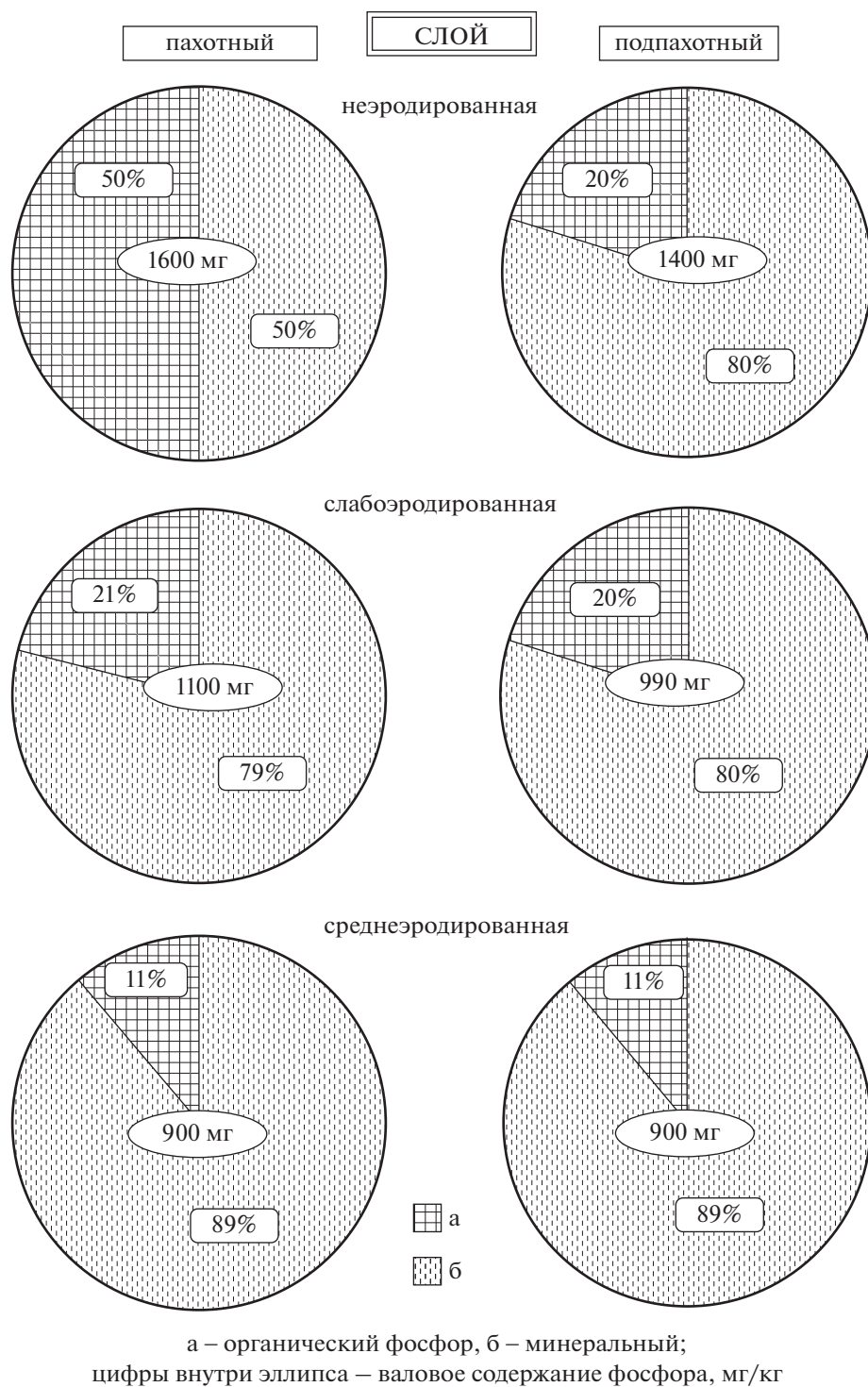
ион-селективного электрода. Содержание биогенных элементов в растениях определяли следующими методами: общий азот после мокрого озоления – по Кьельдалю, фосфор – колориметрическим методом, калий – методом атомно-адсорбционной спектрофотометрии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение содержания форм фосфора в почвах показало, что он аккумулировался больше всего в пахотном слое (0–20 см) как на неэродированной, так и эродированной лугово-черноземной почве (рис. 1). Особенно заметно выделялся по накоплению фосфора пахотный слой неэродированной почвы. По мере увеличения степени ее эродированности содержание валового фосфора обычно снижается, в пахотном слое слабоэродированной и среднеэродированной почв различия были менее заметными. В подпахотном слое (20–40 см) отмечено также самое высокое содержание фосфора только в неэродированной почве. В подпахотных слоях слабо- и среднеэродированных почв относительно неэродированной содержание валового фосфора изменялось существенно, хотя между собой по этому показателю почвы различались мало. По-видимому, воздействие обработки почвы было весьма значительным, что и отразилось на послыном распределении валового фосфора в почве.

Эродированность почвы оказала значительное влияние на доли содержания фосфора в органической и минеральной формах. Максимальную долю органических фосфатов отмечали в пахотном слое неэродированной почвы. При увеличении степени ее эродированности доля содержания фосфора в органической форме снижалась, а минерального фосфора, напротив, возрастала. В подпахотном слое доля содержания органических фосфатов неэродированной и слабоэродированной почв оставалась без изменений, а в среднеэродированной она снизилась почти в 2 раза. Доля минеральных фосфатов относительно органических была больше от 4 до 8 раз, что свидетельствовало о значительном влиянии этих соединений подпахотного слоя на минеральное питание и продуктивность растений.

Различное содержание фосфора в почве отразилось на запасах этого элемента в почвенных слоях. В частности, в пахотном слое неэродированной почвы запасы валового фосфора составили 3.2 т/га, причем половину из этих запасов составили органические фосфаты и такая же доля была представлена минеральными фосфатами. В слабоэродированной и среднеэродированной



**Рис. 1.** Формы фосфора в почвах в зависимости от их эродированности и специфики формирования гумусового горизонта.

почвах запасы валового фосфора уменьшились почти в 1.5 и 1.8 раза соответственно. При этом доля органических фосфатов снизилась до 4.5 раза, минеральных, напротив, возросла в 1.8 раза. В подпахотном слое неэродированной почвы запасы валового фосфора составили 3.6 т/га, в слабоэродированной и среднеэродированной почвах они уменьшились в 1.4 и 1.6 раза соответственно. Более высокие запасы валового фосфора в подпахотном слое были обусловлены повышенной плотностью

сы валового фосфора составили 3.6 т/га, в слабоэродированной и среднеэродированной почвах они уменьшились в 1.4 и 1.6 раза соответственно. Более высокие запасы валового фосфора в подпахотном слое были обусловлены повышенной плотностью

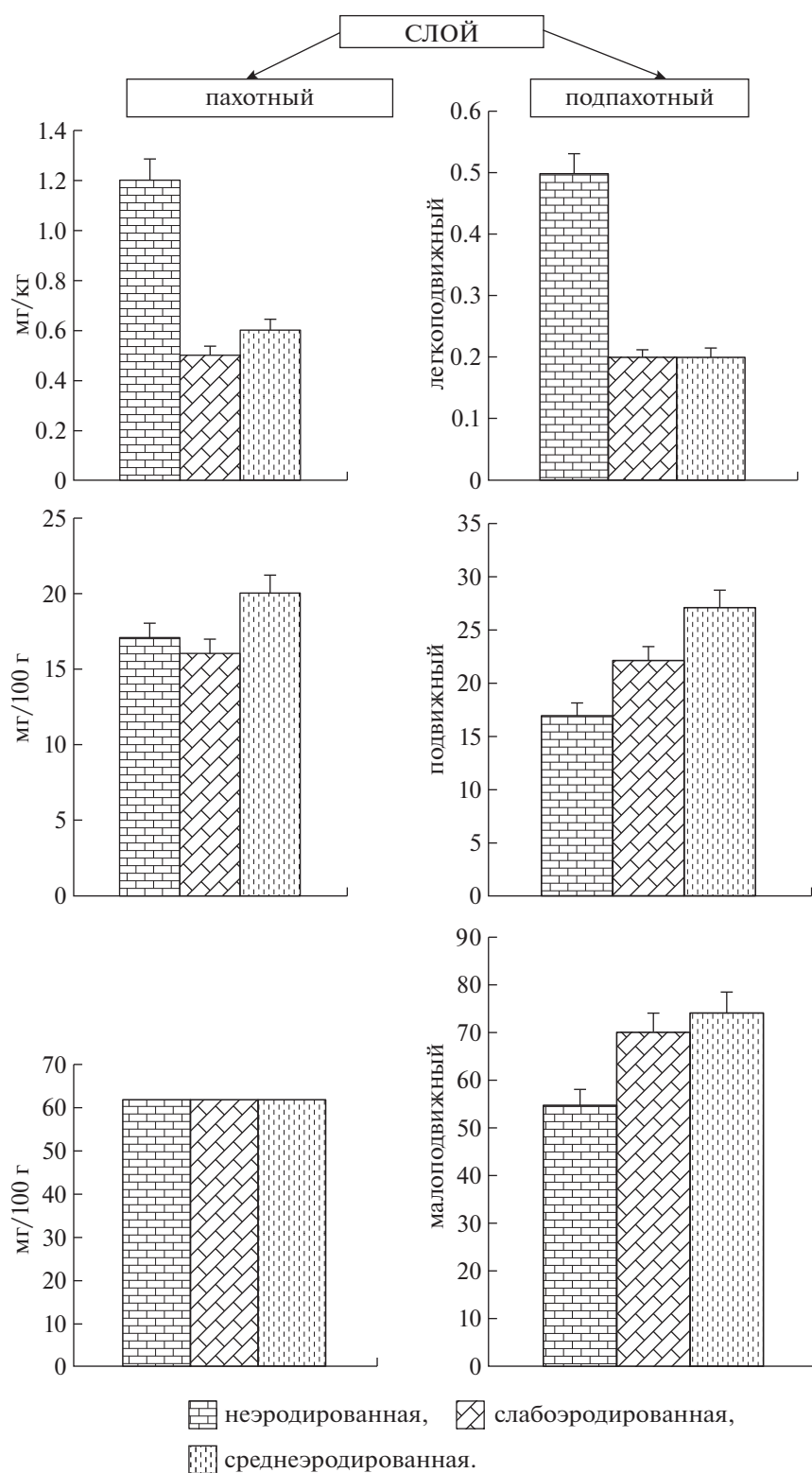


Рис. 2. Содержание подвижных форм фосфора в эродированных почвах.

сложения почвы. Например, в слое 0–20 см она составила 1.08, в слое 20–40 см – 1.29 г/см<sup>3</sup>. Эти различия отразились на запасах фосфора в почвах различной степени их эродированности.

Обеспеченность растений фосфорным питанием во многом зависит от содержания элемента в корнеобитаемом слое почвы в подвижной форме. Исследование показало, что содержание лег-

**Таблица 1.** Влияние эродированности почвы и внесения минеральных удобрений на содержание элементов питания в пахотном слое под луговыми травами

Вариант		N-NO <sub>3</sub>		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		K <sub>2</sub> O	
		мг/кг		мг/100 г			
		1	2	1	2	1	2
Неэродированная почва							
Контроль	2009 г.	3.8	4.8	21.3	23.1	14.3	13.2
N60K60 (фон)		5.3	6.3	20.4	23.8	12.1	13.6
Фон + P60		3.2	4.6	27.1	24.3	11.4	16.3
HCP <sub>05</sub>		0.4	0.4	2.0	2.7	1.2	0.9
Контроль	2010 г.	11.0	3.2	18.7	20.6	21.7	18.9
N60P60K60		6.2	2.3	25.1	20.6	25.5	16.2
HCP <sub>05</sub>		2.7	0.5	2.1	1.8	1.4	1.6
Контроль	2013 г.	10.6	5.8	13.1	15.4	13.9	16.2
N60P60K60		12.2	6.3	14.4	17.1	15.9	16.3
HCP <sub>0.5</sub>		1.7	0.8	1.5	1.6	1.2	1.4
Среднеэродированная почва							
Контроль	2009 г.	2.9	1.1	26.3	24.3	17.6	18.8
N60K60 (фон)		4.2	2.5	23.1	23.7	18.0	18.5
Фон + P60		2.6	1.7	28.2	26.1	16.3	22.1
HCP <sub>05</sub>		0.2	0.7	2.3	1.7	1.5	2.8
Контроль	2010 г.	4.1	3.7	14.6	12.9	14.0	18.9
N60P60K60		4.0	2.3	22.5	14.4	17.0	16.2
HCP <sub>05</sub>		0.4	0.9	1.4	1.5	1.3	1.9
Контроль	2013 г.	2.1	Следы	17.5	18.3	15.7	15.7
N60P60K60		4.7		14.4	20.6	18.2	20.3
HCP <sub>05</sub>		0.4		1.7	1.6	1.3	2.5

Примечание. В графе 1 – кушение, 2 – укосная спелость.

коподвижного фосфора зависело от степени эродированности почвы и сложения ее горизонта (рис. 2). В пахотном и подпахотном слоях неэродированной почвы содержание этой формы фосфора почти не изменялось. Однако в слабо- и среднеэродированной почвах наблюдали резкое снижение содержания легкоподвижных фосфатов. В то же время при определении подвижного фосфора отмечали противоположную закономерность, что особенно четко подтверждалось в подпахотном слое почв различной степени их эродированности. В содержании малоподвижного фосфора в пахотном слое отмечали отсутствие отклонений независимо от интенсивности воздействия на почву. И только в подпахотном слое наблюдали аналогичное возрастание содержания малоподвижного фосфора от последствий увеличения техногенной нагрузки на агроценоз. Полагаем, что отличающееся содержание подвижных

фосфатов в почвах различной степени эродирования связано с разницей в подвижности природных почвенных фосфатов и их доступности для корневой системы растений. При постепенном длительном усвоении природных фосфатов растениями и его отчуждении надземной биомассой происходило различное истощение запасов форм фосфора в почве, влияющее на состояние фитоценоза.

По величине исходного содержания форм фосфора весьма сложно судить об обеспеченности растений фосфорным питанием в течение вегетационного периода. При этом важно знать, как оно увязывалось с обеспеченностью культуры другими элементами питания, в первую очередь азотом и калием. Проведенное исследование показало (табл. 1), что содержание нитратного азота в неэродированной почве под луговыми травами в основном снижалось, хотя в условиях 2009 г. на-

**Таблица 2.** Влияние фосфорных удобрений на урожайность луговых трав на эродированной лугово-черноземной почве, г/м<sup>2</sup>

Вариант	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2013 г.	Среднее за 4 года
Неэродированная почва					
Контроль	<u>274</u>	<u>320</u>	<u>240</u>	<u>242</u>	<u>269</u>
	1110	1380	1130	587	1050
N60K60 (фон)	<u>319</u>	<u>385</u>	<u>310</u>	<u>590</u>	<u>401</u>
	1790	1960	1360	1560	1670
Фон + P60	<u>437</u>	<u>475</u>	<u>410</u>	<u>718</u>	<u>510</u>
	2120	2320	1830	2010	2070
Среднеэродированная почва					
Контроль	<u>240</u>	<u>210</u>	<u>98</u>	<u>126</u>	<u>169</u>
	612	600	420	314	487
N60K60 (фон)	<u>457</u>	<u>308</u>	<u>195</u>	<u>283</u>	<u>311</u>
	1110	1020	900	756	944
Фон + P60	<u>544</u>	<u>313</u>	<u>268</u>	<u>308</u>	<u>358</u>
	1410	1030	1260	862	1140
HCP <sub>05</sub>	<u>26</u>	<u>29</u>	<u>26</u>	<u>32</u>	
	97	110	130	72	

Примечание. Над чертой – сухая биомасса, под чертой – сырая.

блюдали некоторое увеличение содержания этой формы азота. Уменьшение содержания нитратного азота было обусловлено его потреблением растениями в период интенсивного роста. Если условия для роста складывались оптимальными, то луговые травы могли использовать нитраты практически полностью, как это было отмечено для среднеэродированной почвы в условиях 2013 г. Несоответствие между образованием нитратов и их потреблением растениями, которое выявили в 2009 г., вероятно, было связано с другими лимитирующими факторами, поскольку содержание N-NO<sub>3</sub> в фазе кущения было невысоким [12]. Следует отметить, что нитратонакопление в среднеэродированной почве в большинстве случаев уступало неэродированной. Применение удобрений по-разному влияло на содержание нитратного азота, экспериментально показано как его снижение, так и увеличение.

Содержание подвижного фосфора в неэродированной почве мало изменялось в течение вегетационного периода. В условиях 2009 и 2010 гг. обеспеченность растений фосфором была лучшей, чем в 2013 г., когда было показано минимальное количество фосфатов в почве как при использовании удобрений, так и без них. Обеспеченность растений фосфором особенно важна на ранних этапах их развития растений [13], что может иметь решающее значение для продукционного процесса. На среднеэродированной почве

содержание подвижного фосфора было существенно больше в условиях 2009 г., в другие годы оно было значительно меньше. Применение минеральных удобрений в основном повышало содержание подвижного фосфора, хотя были случаи, например, в условиях 2013 г. в фазе кущения отмечали заметное уменьшение величины этого показателя.

На усвоение фосфатов корневой системой и их содержание в почве влияла обеспеченность растений калием. Она зависела от многих факторов: гумусированности почвы, ее удобренности, гранулометрического и минералогического состава породы и др. [14]. В неэродированной почве содержание обменного калия, как правило, было меньше, чем в эродированной, что обусловлено вовлечением новых слоев почвы в активный калийный пул. Вообще по содержанию обменного калия в почве различий практически не наблюдали в разные фазы роста и развития растений. Это свидетельствовало о том, что калий не мог оказаться фактором, нарушавшим сбалансированное почвенное питание в течение продукционного процесса растений.

Пищевой режим почв повлиял на продуктивность луговых трав, который зависел от условий года, эродированности почвы и примененных удобрений (табл. 2). На неэродированной почве была сформирована самая высокая урожайность луговых трав (сухой биомассы) без внесения

**Таблица 3.** Влияние эродированности почвы и фосфорных удобрений на содержание макроэлементов в надземной биомассе луговых трав, % на сухое вещество

Вариант	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	неэродированная почва			среднеэродированная почва		
2009 г.						
Контроль	1.03	0.53	2.02	1.16	0.45	1.88
N60K60 (фон)	1.05	0.60	2.51	1.02	0.48	2.12
Фон + P60	0.92	0.62	2.64	0.95	0.52	2.15
HCP <sub>05</sub>	0.15	0.04	0.26	0.13	0.05	0.19
2010 г.						
Контроль	0.50	0.50	1.82	0.39	0.46	1.68
N60K60 (фон)	0.76	0.43	2.16	0.69	0.32	1.66
Фон + P60	0.65	0.54	2.02	0.82	0.43	1.64
HCP <sub>05</sub>	0.11	0.04	0.20	0.11	0.02	0.14
2013 г.						
Контроль	0.74	0.50	2.53	0.54	0.59	2.42
N60K60 (фон)	0.87	0.54	2.39	0.80	0.42	2.74
Фон + P60	0.98	0.63	2.17	0.91	0.44	2.45
HCP <sub>05</sub>	0.06	0.03	0.11	0.05	0.03	0.08

удобрений в условиях 2010 г., наиболее низкая – в условиях 2011 и 2013 гг. По накоплению сырой биомассы отличался контрольный вариант, в котором было отмечено меньше всего сырого вещества, хотя по накоплению сухой биомассы он мало отличался от других вариантов. На среднеэродированной почве в контрольном варианте меньше всего было синтезировано сухого вещества в условиях 2011 г., в другие годы она была значительно больше. Различия в сухой биомассе, вероятно, были связаны с погодными условиями и с изменениями видового состава луговых трав. Они несколько отличались по требованиям к гидротермическим и почвенным условиям, по-разному реагировали также на световой режим. По количеству накопленной сырой биомассы контрольный вариант также изменялся значительно, примерно в 2 раза меньше в условиях 2009 и 2010 гг. по сравнению с 2013 г. и в 1.5 раза относительно 2011 г.

Внесение азотно-калийных удобрений резко повысило накопление сухой биомассы как на неэродированной, так и среднеэродированной почвах. В среднем за 4 года на неэродированной почве при внесении N60P60 было синтезировано сухой и сырой биомассы примерно в 1.5 раза больше, чем в контрольном варианте. На среднеэродированной почве внесение азота и калия в аналогичных дозах увеличило урожайность сухой

и сырой надземной биомассы в 1.8 и 1.9 раза соответственно.

Усиление фосфорного питания с помощью минеральных удобрений на фоне азота и калия повысило урожайность сухой биомассы во все годы исследования от 1.1 до 1.4 раза, хотя в условиях 2010 г. прибавки урожая от внесения фосфора вообще не были выявлены. В среднем за 4 года исследования на среднеэродированной почве урожай луговых трав увеличился всего на 15%. Примерно в таких же пределах росла продуктивность растений от внесения фосфора в расчете на сырое вещество. Из приведенных данных видно, что наиболее высокая эффективность фосфорных удобрений отмечена на неэродированных почвах, эродированность почвы приводила к снижению отклика растений на усиление фосфорного питания.

Под влиянием эродированности почвы и минеральных удобрений по-разному менялся химический состав луговых трав (табл. 3). Содержание азота в надземной биомассе в контрольном варианте обычно было минимальным как на неэродированной, так и эродированной почвах. Особенно мало азота в растениях отмечали на среднеэродированной почве в луговой траве в условиях 2010 г. в варианте без удобрений, когда содержание азота в сухом веществе растений в этом варианте относительно азотно-калийного фона было меньше в 1.8 раза. Однако на неэродированной почве в условиях 2009 г. отмечали и отсутствие разницы

**Таблица 4.** Влияние эродированности почвы и фосфорных удобрений на вынос макроэлементов надземной биомассой луговых трав, кг/га

Вариант	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	неэродированная почва			среднеэродированная почва		
2009 г.						
Контроль	28.2	14.5	55.3	27.8	10.8	45.1
N60K60 (фон)	33.5	19.1	80.1	46.6	21.9	96.9
Фон + P60	40.2	27.1	115	51.7	28.3	117
HCP <sub>05</sub>	3.4	1.8	6.7	4.2	1.6	8.2
2010 г.						
Контроль	16.0	16.0	58.2	8.2	9.7	35.3
N60K60 (фон)	29.3	16.6	83.2	21.2	9.9	51.1
Фон + P60	30.9	25.7	95.9	25.7	13.4	51.3
HCP <sub>05</sub>	2.7	0.8	7.9	1.8	1.1	4.5
2013 г.						
Контроль	17.9	12.1	61	6.8	7.4	30.4
N60K60 (фон)	51.3	31.9	141	22.6	11.9	77.5
Фон + P60	70.4	45.2	156	28.0	13.6	75.5
HCP <sub>05</sub>	3.8	1.9	12	0.9	1.1	6.1

между содержанием азота в сухом веществе контрольного варианта и варианта N60K60 (фон), а на среднеэродированной почве при внесении азота и калия относительно контроля содержание азота уменьшалось в 1.1 раза. Большая разница в накоплении азота в биомассе растений на среднеэродированной почве между неудобренным и удобренным вариантами, вероятно, была связана с появлением бобовых культур, способных существенно воздействовать на азотный режим почвы. Внесение фосфора на фоне азота и калия влияло на содержание азота в биомассе растений: зарегистрировано как снижение, так и увеличение величины этого показателя.

Содержание фосфора в биомассе луговых трав в отличие от азота в меньшей степени изменялось в фазе укосной спелости. Под влиянием азотно-калийного фона и фосфорных удобрений отмечали как снижение содержания фосфора в сухом органическом веществе луговых трав, так и повышение величины этого показателя. Наибольшее увеличение (на 13 относительных %) содержания фосфора в биомассе растений наблюдали в условиях 2009 г. на неэродированной почве. На следующий год в аналогичном варианте опыта уже отмечали снижение этого показателя на 14%, в условиях 2013 г. разницы в содержании фосфора в этих вариантах не было. Внесение фосфорных удобрений обычно вызывало увеличение содержания этого макроэлемента, хотя был случай, ко-

гда в условиях, например, 2009 г. разница в содержании фосфора практически отсутствовала. На среднеэродированной почве наблюдали подобное явление в вариантах азотно-калийного фона и внесения фосфорных удобрений. Вероятно, это было обусловлено различным видовым составом растений, которые были в различном физиологическом состоянии, потребностью растений в элементах питания в период укосной спелости.

Калий, находящийся в ионном состоянии в растениях, аккумулировался в них по-разному. На неэродированной почве в контрольном варианте содержание калия в луговых травах варьировало в значительных пределах (от 1.8 до 2.5%), что вызывало определенные трудности в обобщении экспериментальных материалов. Содержание калия в луговых травах доминировало над другими элементами питания, особенно над фосфором. Создание фона в виде азота и калия обычно вызывало повышение содержания фосфора в растениях, хотя в условиях 2013 г. наблюдали его заметное уменьшение.

Внесение P60 на фоне N60K60 практически не отразилось на содержании калия в надземной биомассе луговых трав. На среднеэродированной почве ситуация по накоплению калия в растениях была схожей. Существенное изменение в содержании калия в сухой биомассе отмечали лишь в условиях 2013 г., когда под влиянием азотно-ка-



**Таблица 5.** Баланс макроэлементов (кг/га) в эродированной лугово-черноземной почве под луговыми травами на фоне разных уровней фосфорного питания за период 2009, 2010 и 2013 гг.

Вариант	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	неэродированная почва			среднеэродированная почва		
Поступило в почву						
Контроль	–	–	–	–	–	–
N60K60(фон)	180	–	180	180	–	180
Фон + P60	180	180	180	180	180	180
Вынос надземной биомассой						
Контроль	62.1	42.6	175	42.8	27.9	111
N60K60(фон)	114	67.6	304	90.4	43.7	226
Фон + P60	142	98.0	367	105	55.3	242
Баланс						
Контроль	–62.1	–42.6	–175	–42.8	–27.9	–111
N60K60(фон)	65.9	–67.6	–124	89.6	–43.7	–45.5
Фон + P60	57.6	82.0	–187	74.6	125	–61.8

лийного фона содержание его возросло на 13%, а фосфора – уменьшилось на 12 относительных %.

Оценить обеспеченность луговых трав питательными элементами на основе растительной диагностики весьма сложно, поскольку пока, к сожалению, не разработаны лимиты их содержания в конкретных почвенно-климатических условиях и для конкретного органа. Из литературных данных [15] известно, что в тимофеевке содержание общего азота в надземной биомассе в фазе цветения составляет 2.5%, фосфора (в расчете на P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) в период окончания цветения в листьях – 0.30%, калия (K<sub>2</sub>O) в фазе трубкования в надземной части – 3.6–3.9%. В растениях других видов злаков (кострец безостый, ежа сборная) содержание азота, фосфора и калия довольно близкое, если сравнивать сопоставимые экспериментальные данные.

Различная обеспеченность растений элементами минерального питания отразилась на их выносе надземной биомассой (табл. 4). На неэродированной и среднеэродированной почвах в контрольном варианте отмечен самый низкий вынос макроэлементов луговыми травами. Показано, что наиболее низкие показатели отчуждения азота, фосфора и калия биомассой были выявлены в условиях 2010 г. Минимальная разница в выносе макроэлементов луговыми травами отмечена на неэродированной и среднеэродированной почвах в контрольном варианте. На азотно-калийном фоне вынос макроэлементов увеличился, особенно в 2009 и 2013 гг. Небольшую разницу в выносе азота и калия наблюдали на этом фоне в условиях 2010 г. Что касается выноса фосфора биомассой

луговых трав, то в вариантах контроля и применения N60K60 на неэродированной и среднеэродированной почвах показатели практически не различались. Это было связано либо с невысокой продуктивностью растений в исследованных вариантах, либо с низким содержанием фосфора в сухой биомассе луговых трав.

Внесение фосфорных удобрений на фоне азота и калия обычно приводило к увеличению выноса макроэлементов луговыми травами как на неэродированной, так и среднеэродированной почвах. Максимальное увеличение выноса питательных элементов наблюдали в условиях 2013 г., когда вынос азота биомассой на неэродированной почве возрос на 37, фосфора – на 42 и калия – на 10.4%. Увеличился вынос макроэлементов от внесения фосфорных удобрений на фоне N60K60 также и на среднеэродированной почве. В частности, для азота разница в этих вариантах составила 24, фосфора – 14%, для калия изменения были недостоверными. Существенные различия в выносе макроэлементов надземной биомассой обусловлены отличающимися погодными условиями [16] и различиями пищевого режима почв.

Одновременно по-разному под влиянием фосфорных удобрений изменялся расход фосфора на формирование 1 ц сена. Например, на неэродированной почве в варианте без удобрений он возрос с 0.53 до 0.64 кг, на среднеэродированной он остался практически без изменений. Удельный расход азота увеличился: на неэродированной почве без удобрений с 0.77 до 0.93 кг, на среднеэродированной при усилении фосфорно-калийного питания он уменьшился с 0.84 до 0.72 кг.

Удельный расход калия под влиянием калийных удобрений возрастал как на неэродированной, так и среднеэродированной почвах. В варианте без удобрений на неэродированной почве этот показатель возрос с 1.67 до 2.29 кг, на среднеэродированной он повысился с 1.79 до 2.11 кг/ц сена. Отклонения в величинах этих показателей следует учитывать при разработке системы удобрения на почвах, подверженных водной эрозии.

Баланс азота, фосфора и калия в почве под луговыми травами складывался по-разному (табл. 5). Он отличался как в зависимости от эродированности почвы, так и от варианта опыта. Одинаковое количество азота и калия (по 180 кг/га) было внесено в вариантах N60K60 (фон) и фон + P60, фосфора поступило в почву такое же количество только в варианте с внесением этого элемента. За 3 года опыта вынос азота, фосфора и калия по мере улучшения сбалансированности минерального питания возрастал и был самым высоким в варианте фон + P60. Это предопределило величину баланса макроэлементов в агроэкосистеме. Баланс азота и фосфора за 3 года был менее отрицательным в неэродированной почве и более дефицитным в среднеэродированной почве. К сожалению, для расчета баланса азота в неэродированной почве не был определен вклад несимбиотической азотфиксации, а в среднеэродированной почве — симбиотического азота в азотный пул. Не были учтены также газообразные потери азота, а также потери за счет поверхностной и вертикальной миграции. Потери макроэлементов за счет эрозионных процессов при многолетнем возделывании луговых трав были сведены к минимуму. Однако даже без учета других расходных и приходных статей азота можно составить общие представления о балансе азота в почве. Согласно представленным материалам, очевидно, можно утверждать, что ситуация с азотным питанием складывалась на уровне, близком к бездефицитному балансу. На среднеэродированной почве при поселении многолетних бобовых культур азотные удобрения можно не вносить вообще.

Для фосфора при использовании минеральных удобрений в варианте фон + P60 в неэродированной почве складывался значительный положительный баланс, поэтому на компенсационном уровне дозу фосфора можно уменьшить примерно на 30 кг/га. В связи с тем, что внесение калийных удобрений не повышало урожайность луговых трав, в течение ряда лет можно не вносить калий даже при отрицательном балансе соответствующего элемента. Однако при длительном дефиците калийного питания урожайность

постепенно начнет уменьшаться, и тогда возникнет потребность во внесении калия в почву.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что фосфатный фонд полугидроморфных лугово-черноземных неэродированных почв представлен органическими и минеральными фосфатами примерно в равной доле. По мере усиления эродированности почв доля органического фосфора снижалась, а минерального, напротив, возрастала. В подпахотном слое доля органических фосфатов в неэродированной и слабоэродированной почвах оставалась без изменений, а в среднеэродированной она снизилась почти в 2 раза. Доля минеральных фосфатов относительно органических была больше от 4 до 8 раз, что свидетельствовало о значительном влиянии форм фосфора подпахотного слоя на их запасы. В слабоэродированной и среднеэродированной почвах запасы валового фосфора уменьшились почти в 1.5 и 1.8 раза соответственно. При этом в результате аккумуляции запасы органических фосфатов снизились до 4.5 раза, а минеральных, напротив, возросли до 1.8 раза.

Степень эродированности почвы и сложение ее горизонтов влияли на содержание легкоподвижного фосфора по-разному. В пахотном и подпахотном слоях неэродированной почвы содержание этой формы фосфора почти не изменялось. Однако в слабо- и среднеэродированной почвах наблюдали резкое снижение его содержания (в 2.0–2.5 раза).

Содержание подвижного фосфора постепенно возрастало по мере усиления эродированности почвы. Содержание малоподвижного фосфора в пахотном слое не изменялось и не зависело от интенсивности антропогенного воздействия на почву. И только в подпахотном слое наблюдали увеличение содержания малоподвижного фосфора при активизации эрозионных процессов. Полагаем, что это было связано с различной подвижностью природных фосфат-ионов в почвенном профиле и их неодинаковой усвояемостью корневой системой растений.

Усиление фосфорного питания с помощью минеральных удобрений на фоне азота и калия повысило урожайность сухой биомассы луговых трав за все годы исследования от 1.1 до 1.4 раза. В среднем за 4 года опыта урожай луговых трав на среднеэродированной почве возрос на 15%. Наиболее высокую эффективность фосфорных удобрений наблюдали на неэродированной почве, увеличение эродированности почвы уменьшало отклик растений на усиление фосфорного пита-

ния. При этом баланс фосфора в почвах независимо от степени их эродированности был положительным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кудеярова А.Ю.* Фосфатогенная трансформация почв. М.: Наука, 1994 г. 288 с.
2. *Heming S.D.* Phosphorus balances for arable soils in Southern England // *Soil Use Manag.* 2007. V. 23. № 2. P. 162–170.
3. *Asfary A.F., Al-Merey R., Al-Hameich M.* Fractionation of applied <sup>32</sup>P labelled TSP in calcareous soils // *Plant and Soil.* 2004. V. 264. P. 171–183.
4. *Никитишен В.И.* Плодородие почвы и устойчивость функционирования агроэкосистемы. М.: Наука, 2002. 258 с.
5. *Назарюк В.М.* Почвенно-экологические основы оптимизации питания растений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 364 с.
6. *Якутина О.П., Назарюк В.М.* Оценка плодородия эродированных почв юга Западной Сибири // *Агрохимия.* 2007. № 9. С. 10–20.
7. *Armstrong R.D., Heljar K.R.* Utilisation of labeled mineral and organic phosphorus sources by grasses common to semi-arid Mulga shrublands // *Austral. J. Soil Res.* 1993. V. 31. P. 271–283.
8. *Ковалев Р.В., Ильин В.Б., Трофимов С.С.* Почвы Новосибирской области. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1966. 422 с.
9. *Якутина О.П.* Изменение фосфатного фонда черноземных почв Западной Сибири под влиянием водной эрозии // *Агрохимия.* 2006. № 2. С. 16–21.
10. *Богданов Н.И.* Почвы и их плодородие. Омск: ОГИЗ, 1952. 44 с.
11. *Касицкий Ю.И.* Агрохимические аспекты решения проблемы фосфора в земледелии СССР // *Агрохимия.* 1983. № 10. С. 16–31.
12. *Кочергин А.Е.* Условия азотного питания зерновых культур на черноземах Западной Сибири // *Агробиология.* 1956. № 2. С. 76–88.
13. *Блэк К.А.* Растение и почва. М.: Колос, 1973. 504 с.
14. *Пчелкин В.У.* Почвенный калий и калийные удобрения. М.: Колос, 1966. 336 с.
15. *Церлинг В.В.* Диагностика питания сельскохозяйственных культур: Справ-к. М.: Агропромиздат, 1990. 235 с.
16. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Гидротермический ресурс и биопродуктивность эродированных почв юга Западной Сибири // *Плодородие.* 2017. № 3. С. 35–39.

### Phosphate as Eroded Meadow-Chernozem Soils and the Efficiency of Phosphorus Fertilizers in Conditions of Western Siberia

V. M. Nazaryuk<sup>a</sup> and F. R. Kalimullina<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> *Institute of Soil Science and Agrochemistry  
prosp. Akad. Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

\**E-mail: flura.kalimullina@yandex.ru*

The study of the phosphate fund of semi-hydromorphic meadow-Chernozem soils of varying degrees of erosion showed that the content of phosphorus forms depended on the specifics of the formation of the humus horizon and the enrichment of the soil-forming rock with this element. In the soil of erosion in the 0–20 cm layer contained approximately half of the phosphate in organic matter and the same in the mineral, thin, phosphorus – 1.2 mg/kg, mobile and sedentary – 17 and 62 mg/100 g. The increasing erosion of the soil decreased the proportion of organic phosphorus, but increased mineral. The effectiveness of phosphate fertilizers depended primarily on weather conditions, soil erosion and the content of mobile phosphates in it. The yield of grass during 4 years of research on soil without erosion when making P60 in the background N60K60 increased by average of 27, on soil of average erosion – 15%.

*Key words:* phosphate state, eroded meadow-Chernozem soils, efficiency, phosphorus fertilizers, Western Siberia.