

УДК 631.416.2:631.459:631.445.4:631.811.2

## ФОРМЫ ФОСФОРА В ЭРОДИРОВАННЫХ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ИХ РОЛЬ В МИНЕРАЛЬНОМ ПИТАНИИ РАСТЕНИЙ

© 2021 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: kalimullina@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 21.01.2020 г.

После доработки 03.06.2020 г.

Принята к публикации 10.11.2020 г.

В почвенном профиле выявлено существенное снижение содержания органического фосфора, значительно меньшее в группе минеральных фосфатов. По мере усиления эродированности почвы содержание и запасы фосфатов снижались, особенно в группе органических. Обнаружены также изменения в содержании подвижных форм фосфора. В некоторых слоях гумусово-аккумулятивного горизонта неэродированной почвы содержание легкоподвижного фосфора было больше, чем в эродированной примерно в 2.0–2.5 раза. Содержание и запасы подвижного и малоподвижного фосфора в гумусово-аккумулятивном горизонте были значительно меньше, чем в иллювиальных горизонтах В1 и В2. Это связано с непропорциональным образованием минеральных фосфатов в почве и их потреблением растениями в период вегетации, что обусловлено спецификой гидротермических условий среды. Внесение фосфорных удобрений способствовало повышению содержания подвижного фосфора в почве на 22–33% и продуктивности растений на 19–37%.

*Ключевые слова:* эродированная почва, гумус, формы фосфора, удобрение, растение.

DOI: 10.31857/S0002188120120066

### ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое и экологически безопасное функционирование агроэкосистем во многом зависит от состояния фосфатного фонда почв [1–3]. При формировании продуктивности растений при их выращивании по экстенсивной технологии потребность в фосфорном питании удовлетворялась во многом за счет почвенных ресурсов, либо применением невысоких доз фосфорных удобрений [4]. Однако при создании условий, обеспечивающих интенсивный рост растений, потребность в фосфоре резко возрастает [5]. Поэтому важно знать состояние и возможности природного фосфатного фонда и роль удобрений в интенсификации продукционного процесса. По данным [6], для почв юго-восточной части Западной Сибири присуще высокое содержание общего фосфора, значительная часть которого представлена (48% от валового) минеральной формой, высокоосновными соединениями кальция (13.6%) и окклюдированными фосфатами (22.6%). К тому же, содержание фосфора и его форм зависит от специфики геоморфологического и геохимического

накопления элемента в почвенной толще. Исследованные лугово-черноземные почвы относятся к структуре минеральных фосфатов Приобского типа [7]. Для них характерно высокое содержание элемента в материнских породах – до 90–100 мг/100 г, доля высокоосновных фосфатов оказалась в них значительно больше по сравнению с другими типами почвообразования. Показано [8], что в лугово-черноземных почвах Западно-Сибирской провинции фосфор связан в основном с органическим веществом, среди минеральных форм преобладают фосфаты алюминия и железа, что снижает активность усвоения фосфатов растениями. В выпаханых лугово-черноземных почвах большую роль в восстановлении их плодородия играют не только удобрения, но и состояние природных экосистем, например, при зарастании почв березовыми и осиновыми лесами значительно активизируются процессы аккумуляции фосфора [9]. Показана доступность и запасы почвенных фосфатов пахотного и подпахотного слоев и их роль в снабжении растений соответствующим элементом [10]. Малоизученной остается проблема распределе-

ния форм фосфора по профилю лугово-черноземных почв, особенно эродированных, а также их доступность растениям и необходимость обоснованного применения удобрений. Актуальность данного почвенно-агрохимического направления возрастает в связи с нестабильными гидро-термическими и обостряющимися экологическими условиями.

Цель работы – оценка фосфатного фонда эродированных лугово-черноземных почв и возможности его регулирования и эффективного использования.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевое исследование 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 – 5.6 и 0.28%, слабоэродированной – 4.5 и 0.2, среднеэродированной – 3.4 и 0.19% соответственно, средне обеспечена подвижным фосфором. Содержание обменного калия в неэродированной почве составило 14.5, среднеэродированной – 15.6 мг/100 г. Величина  $pH_{H_2O}$  находилась в пределах 5.3–5.5.

Микрополевые опыты с луговыми травами, яровой пшеницей (сорт Новосибирская 22) и картофелем (сорт Луговской) проводили 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  $N_m$ ,  $P_{ст}$  и  $K_x$ . Для изучения сравнительной оценки эффективного плодородия антропогенно-преобразованных почв отбирали образцы многолетних трав, пшеницы и картофеля в трех-, четырехкратной повторности. Образование минеральных фосфатов при компостировании эродированных почв определяли при температуре 8–10 и 22–25°C в течение 45 сут.

Аналитическую работу выполняли следующими методами: 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–Замятинской, подвижный фосфор – по Чирикову, малопо-

движный (нами предложенная форма фосфора) – в 1 н. НСІ при соотношении почва : раствор = 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 – на атомно-адсорбционном спектрофотометре.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение форм фосфора по профилю лугово-черноземной почвы показало, что их содержание и распределение по профилю зависели от степени геоморфологического воздействия и специфики формирования почвенных горизонтов (табл. 1). В пахотном слое неэродированной почвы доли органических и минеральных фосфатов находились примерно в равном соотношении, с глубиной ситуация резко менялась даже в пределах одного горизонта А. Например, содержание органических фосфатов в слое 30–40 см относительно слоя 0–10 см уменьшилось в 4 раза, а в слое 50–60 см снизилось даже в 8 раз. Содержание минеральных фосфатов по сравнению с органическими в почвенном профиле изменялось в небольших пределах – 0.07–0.09%. В слабоэродированной почве содержание органических фосфатов в слоях 0–10 и 10–20 см в сравнении с аналогичным слоем неэродированной почвы уменьшилось на 0.25–0.28%. На глубине 50–60 см присутствие этой формы фосфора выровнялось и достигло 0.01%. Минеральные фосфаты распределялись по почвенному профилю довольно равномерно, величина их менялась в пределах 0.06–0.08%. В среднеэродированной почве содержание минеральных фосфатов изменялось также незначительно. В то же время содержание органических фосфатов в среднеэродированной почве по сравнению с неэродированной и слабоэродированной почвой снизилось примерно от 2.0 до 3.5 раза. Отсюда видно, что в результате процессов водной эрозии наибольшие изменения в содержании фосфатов происходили в группе органических фосфатов. Это отражалось на содержании валового Р по профилю эродированных почв и его запасах. Обычно максимальное количество элемента аккумулируется в гумусовом горизонте, минимальное – в иллювиальном [11–13].

**Таблица 1.** Содержание и запасы форм фосфора по профилю эродированной лугово-черноземной почвы

Глубина, см	Горизонт	Минеральный		Органический		Валовой	
		1	2	1	2	1	2
Неэродированная почва							
0–10	Апах	0.09	0.98	0.08	0.87	0.17	1.85
10–20		0.08	0.87	0.07	0.76	0.15	1.63
20–30	А	0.07	0.84	0.03	0.36	0.10	1.20
30–40		0.07	0.84	0.02	0.24	0.09	1.08
40–50	АВ	0.07	0.94	0.02	0.27	0.09	1.21
50–60		0.08	1.07	0.01	0.13	0.09	1.20
60–70	В1	0.08	1.16	0.01	0.14	0.09	1.30
70–80		0.07	1.02	0.02	0.29	0.09	1.31
80–90	В2	0.08	1.21	0.01	0.15	0.09	1.36
90–100		0.07	1.06	0.01	0.15	0.08	1.21
Слабоэродированная почва							
0–10	А	0.08	0.87	0.06	0.65	0.14	1.52
10–20		0.08	0.87	0.05	0.54	0.13	1.41
20–30		0.07	0.84	0.02	0.24	0.09	1.08
30–40	А+АВ	0.07	0.84	0.02	0.24	0.09	1.08
40–50		0.07	0.92	0.01	0.13	0.08	1.05
50–60	В1	0.06	0.79	0.01	0.13	0.07	0.92
60–70		0.06	0.87	0.01	0.14	0.07	0.94
70–80		0.06	0.87	0.02	0.29	0.08	1.16
80–90	В2	0.07	1.06	0.01	0.15	0.08	1.21
90–100		0.06	0.91	0.01	0.15	0.07	1.06
Среднеэродированная почва							
0–10	А+АВ	0.08	0.87	0.03	0.33	0.11	1.20
10–20		0.07	0.76	0.02	0.22	0.09	0.98
20–30	АВ	0.08	0.96	0.01	0.12	0.09	1.08
30–40		0.08	0.96	0.01	0.12	0.09	1.08
40–50	В1	0.09	1.18	0.01	0.13	0.10	1.31
50–60		0.09	1.18	0.01	0.13	0.10	1.31
60–70	В2	0.07	1.02	0.01	0.14	0.09	1.16
70–80		0.06	0.87	0.02	0.29	0.08	1.16
80–90		0.06	0.91	0.01	0.15	0.07	1.06
90–100	С	0.06	0.91	0.01	0.15	0.07	1.06
<i>НСП<sub>05</sub></i>		0.004	0.05	0.01	0.02	0.01	0.15

Примечание. В графе 1 – содержание, %; 2 – запасы, т/га.

По содержанию органических и минеральных форм фосфора в почве весьма сложно судить об обеспеченности растений фосфорным питанием [2]. Более надежную информацию о состоянии фосфатного фонда, от которого зависит функционирование агроценозов, можно получить на основе содержания подвижных форм [14]. Выявлено, что содержание легкоподвижного фосфора в

неэродированной почве аккумулировалось в слое 0–10 см, с глубиной оно постепенно снижалось и достигало минимума в слое 90–100 см (табл. 2). В слабоэродированной и среднеэродированной почвах закономерность была иной. В первом случае минимальное содержание отмечено уже в слое 30–40 см и вновь обнаруживалось в слое 90–100 см, во втором случае минимальное содержа-

**Таблица 2.** Содержание и запасы подвижных форм фосфора и их распределение по почвенному профилю

Глубина, см	Легкоподвижный (0.03 н. K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )		Подвижный (0.5 н. CH <sub>3</sub> COOH)		Малоподвижный (1 н. HCl)	
	1	2	1	2	1	2
Неэродированная почва						
0–10	1.52	16.6	175	191	638	695
10–20	0.92	10.0	167	182	604	658
20–30	0.49	5.9	136	163	559	671
30–40	0.32	3.8	150	180	542	650
40–50	0.31	4.1	186	249	556	745
50–60	0.34	4.6	264	354	723	969
60–70	0.20	2.9	274	397	706	1020
70–80	0.09	1.2	263	381	678	983
80–90	0.07	1.1	175	264	723	1090
90–100	0.06	1.1	167	252	641	968
Слабоэродированная почва						
0–10	0.72	7.6	164	179	619	675
10–20	0.27	2.7	150	164	612	667
20–30	0.18	2.4	159	191	613	668
30–40	0.06	0.7	273	328	791	862
40–50	0.07	0.9	270	362	804	1080
50–60	0.16	2.1	245	328	766	1030
60–70	0.09	1.3	191	277	661	958
70–80	0.08	1.2	136	197	599	868
80–90	0.07	1.1	168	254	625	944
90–100	0.06	0.9	163	246	558	843
Среднеэродированная почва						
0–10	0.60	6.5	192	209	634	691
10–20	0.24	2.2	202	220	597	651
20–30	0.11	1.1	268	322	734	881
30–40	0.07	0.8	282	338	757	908
40–50	0.06	0.8	263	352	773	1040
50–60	0.02	0.3	242	324	744	997
60–70	0.03	0.4	164	237	601	871
70–80	0.05	0.7	130	196	538	780
80–90	0.06	0.9	135	195	538	812
90–100	0.08	1.2	126	190	511	772
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	0.01	0.1	19	33	66	87

Примечание. В графе 1 – содержание, мг/кг, 2 – запасы, кг/га.

ние легкоподвижного фосфора отмечено в слое 50–60 см, а затем заметно повышалось и достигло максимума на 1-метровой глубине. Запасы легкоподвижного фосфора были также максимальными в неэродированной почве в горизонтах А + АВ, значительно меньше – в слабоэродированной и еще меньше – в среднеэродированной.

В содержании подвижного фосфора в почвах наблюдали другую закономерность, связанную с накоплением элемента в гумусовом горизонте. Максимальное количество этой формы фосфора отмечено в среднеэродированной почве, в неэродированной и слабоэродированной почвах его было существенно меньше. С глубиной содержа-

ние фосфора в профиле этих почв изменяется по-разному. В неэродированной почве максимальное количество подвижного фосфора отмечено в иллювиальном горизонте В1, но постепенно оно снижалось и достигло минимума в горизонте В2 (слой 90–100 см). В слабоэродированной почве увеличение содержания подвижного фосфора начиналось несколько раньше, со слоя 20–30 см и достигло наибольшей величины в слоях 30–40 и 40–50 см. С глубиной оно постепенно снижалось и оказалось наименьшим в слое 90–100 см. В среднеэродированной почве увеличение содержания подвижного фосфора началось с гумусового и переходного горизонтов А + АВ и АВ. Наивысшая аккумуляция доступного растениям фосфора отмечена в слое 30–40 см, затем его количество снижалось и достигло минимума в материнской породе С. Запасы подвижного фосфора и его распределение по профилю почвы также зависели от степени ее эродированности и сформированного почвенного горизонта. Максимальные запасы этой формы фосфатов в 1-метровом слое (~2700 кг/га) отмечали в среднеэродированной почве, заметно меньшие (2600 кг) – в неэродированной и еще меньшие (2500 кг/га) – в слабоэродированной.

В отношении малоподвижного фосфора во многом повторялась закономерность распределения подвижных фосфатов, хотя и наблюдали определенные отличия. Например, в неэродированной почве максимальное содержание малоподвижных фосфатов обнаруживалось на глубине 50–60 и 80–90 см. В слабоэродированной почве наибольшее содержание этой формы фосфора отмечено только один раз на глубине от 30 до 50 см. С глубиной оно снижалось до 30%. По профилю среднеэродированной почвы постепенное повышение содержания малоподвижных фосфатов начиналось с горизонта А и достигло наибольшей величины в слое 40–50 см. С увеличением глубины отбора образцов обнаруживали значительное уменьшение темпов аккумуляции этого элемента. В целом запасы малоподвижных фосфатов в 1-метровом слое в неэродированной почве составили примерно 8500 кг, в слабоэродированной – 8600 кг и в среднеэродированной – 8400 кг/га.

Полученные результаты однозначно свидетельствовали о повышенном содержании подвижной и малоподвижной форм фосфора в переходном гумусовом и иллювиальных горизонтах. Объяснить такое распределение элемента по почвенному профилю, не прибегая к специальным дополнительным исследованиям, сложно. Потребовалось выяснить влияние тепловых воздействий и компостирования почвы на содержа-

ние наиболее подвижных форм фосфора, которые более изменчивы в течение вегетационного периода. Были взяты почвенные образцы неэродированной и среднеэродированной почв. Увлажняли их до 80% от ППВ и поддерживали заданную влажность почв в течение всего исследованного периода. Компостируют почвенные образцы в течение 45 сут при температуре 5–10 и 20–25°C. Результаты исследования показали, что в содержании легкоподвижного фосфора четкой закономерности не выявлено. Под влиянием температуры и эродированности почвы наблюдали как повышение содержания этой формы фосфора, так и его снижение (рис. 1). Поскольку значительное количество фосфора содержится в органическом веществе, то под влиянием микроорганизмов и повышенной температуры должен накапливаться легкоподвижный фосфор. Однако этого в эксперименте не наблюдали. По нашему мнению, такое явление связано с тем, что при динамически равновесном состоянии фосфор относительно легко может переходить из одной формы в другую. В отличие от легкоподвижных фосфатов содержание подвижного фосфора в почвах достоверно повышалось при компостировании при разных интервалах температур. Однако эродированность почвы не отразилась на ее фосфат-минерализующей способности. Такое явление, вероятно, связано с тем, что наряду с накоплением подвижного фосфора в почве происходит аккумуляция нитратного азота, который по принципу обратной связи ингибирует процессы минерализации органического вещества и, в конечном итоге, выравнивает интенсивность действия исследованных факторов. В естественных условиях в пределах одной и той же лесостепной зоны полугидроморфная лугово-черноземная почва формируется как более холодная, чем автоморфная, например, черноземная. В нижних горизонтах она прогревается медленнее [15], что сказывается на усвоении элементов питания и ростовых процессах. В лугово-черноземной почве корневая система лучше развивается в верхнем гумусово-аккумулятивном горизонте, там активнее усваивается растениями фосфор и другие питательные элементы. К тому же потребность в них в первую половину вегетации существенно больше, чем во вторую. После того, как прогреется корнеобитаемый слой, фосфатминерализующая способность почвы возрастает, однако потребность растений в фосфоре снижается. Происходит дисбаланс в образовании минеральных фосфатов и их потреблении растениями. В результате многолетнего воздействия гидротермических условий наблюдаем результат почвенных процессов, вызывающих

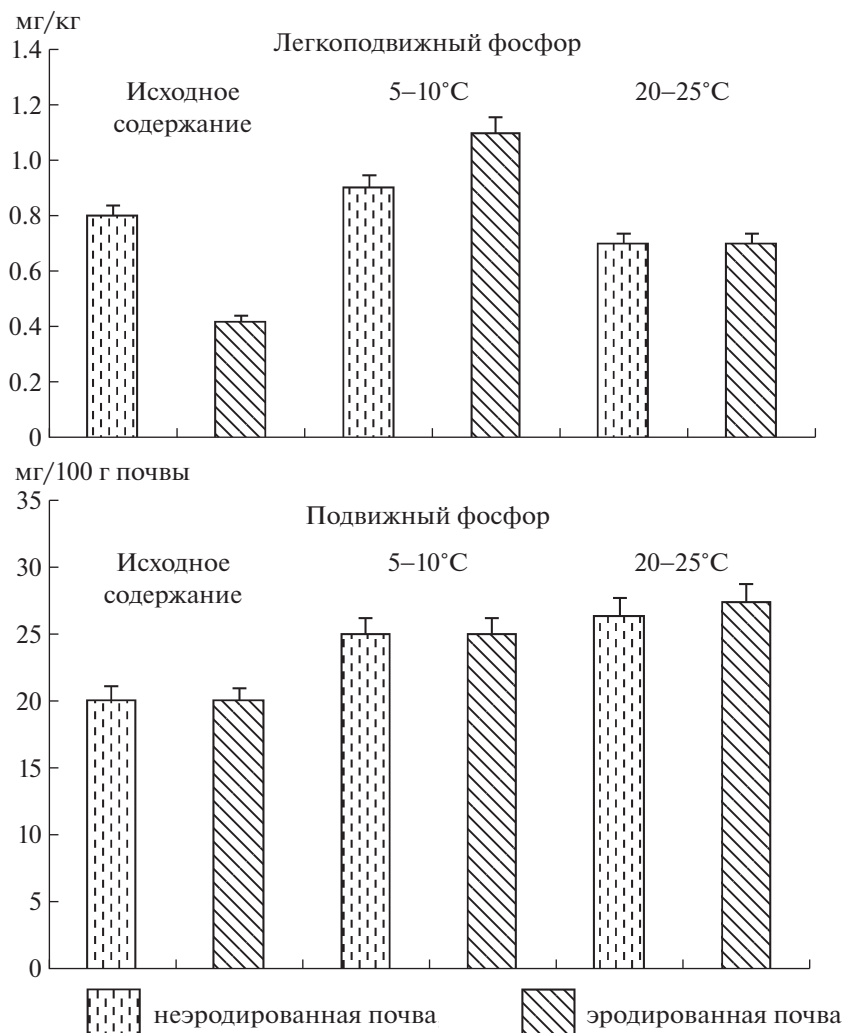


Рис. 1. Влияние компостирования и эродированности почвы на содержание в ней форм фосфатов.

накопление подвижного и малоподвижного фосфора в переходном гумусово-аккумулятивном горизонте АВ и иллювиальных В1 и В2.

Сведения о содержании и запасах подвижных форм фосфора в эродированных почвах недостаточны для оценки обеспеченности растений элементом в течение вегетационного периода. Необходимо было определить содержание подвижных соединений фосфора в начале и конце вегетационного периода. Исследования показали, что обеспеченность растений этим элементом зависела от эродированности почвы и применения фосфорных удобрений (рис. 2). В опыте 2009 г. содержание подвижных фосфатов в среднеэродированной почве в фазе кущения растений было заметно больше, чем в неэродированной (вариант НК). В укосную спелость разница в содержании фосфатов в почвах различной эродированности выравнилась. Внесение фосфорных удобрений

повысило содержание подвижных фосфатов в среднеэродированной почве во все периоды наблюдений, в неэродированной почве достоверные различия в количестве фосфатов отмечали только в фазе кущения. Можно полагать, что внесение удобрений в эффективных дозах не только повысило содержание подвижных фосфатов в почве, но и удовлетворило потребность растений в данном элементе.

На основе результатов продуктивности растений выявлена различная эффективность минеральных удобрений в исследованных почвах (табл. 3). Совместное внесение азота и калия в неэродированную почву в условиях 2009 г. практически не отразилось на урожайности луговых трав, но существенно повысило ее в 2013 г. На среднеэродированной почве усиленное азотно-калийное питание вызвало достоверное увеличение продуктивности травянистых растений.

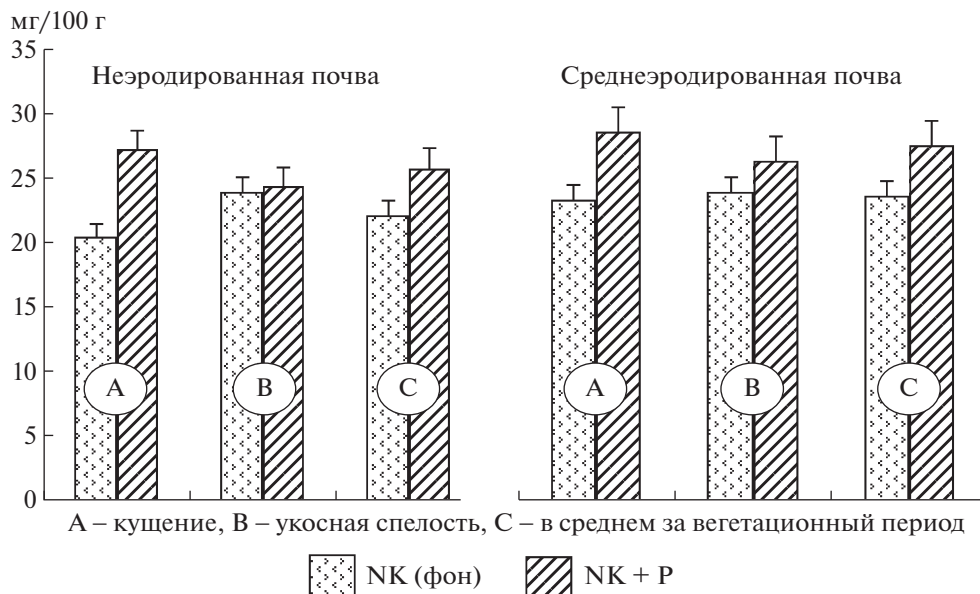


Рис. 2. Влияние эродированности почвы и фосфорных удобрений на содержание подвижного фосфора в пахотном слое.

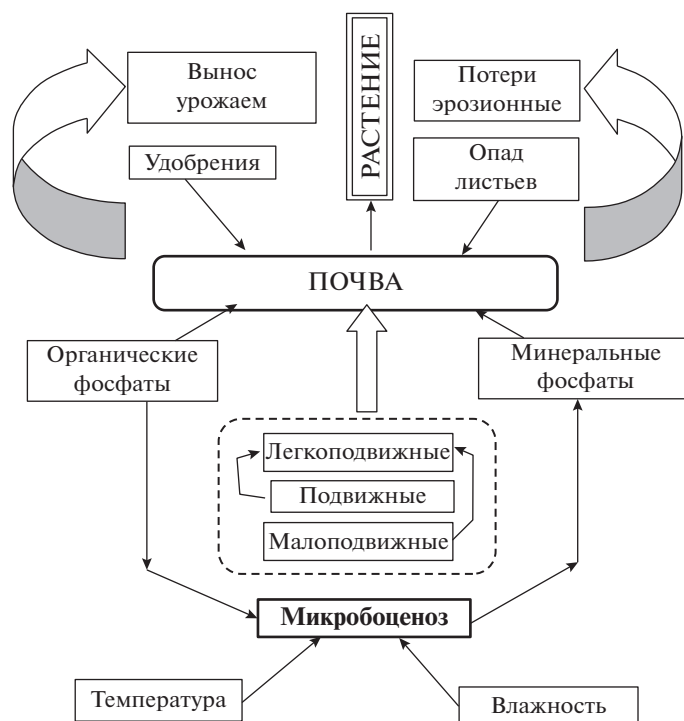


Рис. 3. Модель состояния фосфатного ресурса эродированных лугово-черноземных почв Приобья.

Использование полного минерального удобрения существенно повысило урожайность сельскохозяйственных культур независимо от условий года и эродированности почвы. Внесение фосфорных удобрений на фоне азота и калия увеличивало продуктивность луговых трав, за исключением варианта N60K60+P60 на среднеэро-

дированной почве в условиях 2013 г. Это, вероятно, связано с изменением содержания фосфора в почве в связи с меняющимися погодными условиями. Этот год был чрезмерно увлажненным по сравнению с 2007 и 2009 гг. Гидротермический коэффициент исследованных лет менялся от 1.04 до 1.49. Под влиянием минеральных удобрений

**Таблица 3.** Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество сельскохозяйственных культур

Вариант	Картофель, 2007 г.		Яровая пшеница, 2009 г.		Луговые травы, 2009/2013 гг.	
	1	2	1	2	1	2
	Урожайность, ц/га					
Контроль	320	210	17.2	9.4	27.5/24.2	24.0/12.6
N60K60	—	—	—	—	31.9/59.0	45.7/28.3
N60P60K60*	470	313	29.0	23.2	43.7/71.8	54.4/30.8
HCP <sub>05</sub>	23	18	2.1	1.3	2.7/4.8	2.6/2.4
Соотношение товарной продукции к вегетативной массе						
Контроль	1.94	2.56	0.60	0.60	—	—
N60P60K60*	2.51	1.06	0.62	0.66	—	—
HCP <sub>05</sub>	0.18	0.11	0.05	0.04	—	—
Содержание сухого вещества, %						
Контроль	23	22	—	—	24.7/41.2	39.2/40.1
N60K60	—	—	—	—	17.8/37.9	41.2/37.4
N60P60K60*	24	21	—	—	20.6/35.7	39.5/35.7
HCP <sub>05</sub>	1.6	1.8	—	—	1.7/2.6	3.2/2.9
Сбор протеина, кг/га						
Контроль	6.9	5.6	175	92.2	176/112	174/39.3
N60K60	—	—	—	—	234/321	291/95.4
N60P60K60*	7.5	6.3	360	265	251/440	323/121
HCP <sub>05</sub>	0.5	0.4	23.7	13.5	16.8/24.2	17.6/5.6

Примечание. В графе 1 – незэродированная почва, 2 – среднезэродированная; над чертой – данные за 2009 г, под чертой – 2013 г.  
\*Дозы удобрений под картофель N90P90K90.

по-разному изменялось качество продукции. Наблюдалось как ее улучшение (существенно увеличился сбор протеина в зерне пшеницы и луговых травах), так и состояние практически без изменений (например, содержание сухих веществ в картофеле).

Моделирование фосфатного фонда эродированных лугово-черноземных почв показало, что основные составляющие регулирования фосфорного питания реализуются путем трансформирования органических и минеральных фосфатов, а также воздействия на почвообразующую породу (рис. 3). Пул этих соединений может уменьшаться или увеличиваться в процессе минерализации почвенного органического вещества или гумификации растительных остатков [16, 17]. Решающую роль в этом блоке играет микробоценоз, активность которого зависит, прежде всего, от температурного и водного режима почв [18]. Поддержание пула органических и минеральных фосфатов можно осуществить лишь в случае сохранения равновесного состояния подвижных форм фосфора. Термодинамика перехода элемента из одного состояния в другое зависит от поступления энергии в систему и расходования ее в процессе усвоения элемента корневой системой растений.

Изменить равновесное состояние фосфора в формах различной степени подвижности можно путем влияния на структуру и гранулометрический состав почвы, регулирования гумусного состояния, подбора и регулирования травостоя [19], применения экологически безопасных средств химизации и других приемов интенсификации продукционного процесса растений. В каждом конкретном случае один и тот же агротехнический прием может активизировать процессы аккумуляции энергетически менее затратных, легкодоступных для растений соединений фосфора, либо ингибированию этих процессов. Ясно, что без оптимизации почвенных процессов невозможно добиться экологически безопасной и экономически менее затратной продукции. Особо отметим, что на фосфатный ресурс эродированных почв существенное влияние оказывают как приходные статьи (внесение фосфорных удобрений и поступление элемента с опадом листьев), так и расходные (вынос фосфора урожаем и эрозионные потери, которые сильно зависят от геоморфологии и геохимии почвенного покрова).



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение форм фосфора в лугово-черноземных почвах показало, что их содержание и распределение по почвенному профилю имеет свою специфику. Она заключается в том, что гумусовый горизонт растянут, в нем постепенно снижается содержание органического фосфора, но мало изменяется группа минеральных фосфатов. Отношение между органическими и минеральными фосфатами в пахотном слое неэродированной почвы приближается к единице, но в конце гумусового горизонта (слой 50–60 см) оно достигает 0.1, хотя в иллювиальном горизонте В1 иногда составляет 0.3. По мере усиления эродированности почвы содержание и запасы органических фосфатов снижаются в значительно большей степени, чем минеральных, и стабилизируются на низком уровне в горизонтах, контактирующих с материнской породой.

Под влиянием водной эрозии в почвенном профиле неэродированной почвы изменяются подвижные формы фосфора, особенно во фракции легкоподвижных соединений. В слое 0–10 см гумусово-аккумулятивного горизонта содержание легкоподвижного фосфора было больше, чем в аналогичном слое слабо- и среднеэродированной почвы примерно в 2.0–2.5 раза. Минимальное его количество обнаружено в почве на границе элювиально-иллювиального горизонтов. Содержание и запасы подвижного и малоподвижного фосфора изменяются по профилю почвы: в верхних слоях гумусового горизонта содержится их значительно меньше, чем в иллювиальном горизонте В1 и В2. Это объясняется непропорциональным образованием минеральных фосфатов в полугидроморфной почве и их потреблением растениями, которое обусловлено специфическими гидротермическими условиями.

Внесение фосфорных удобрений способствует повышению содержания подвижного фосфора, особенно в среднеэродированной почве. В неэродированной почве разница в содержании доступных растениям фосфатов на ранних этапах роста существенная, к укосной спелости она нивелируется. Это отражается на продуктивности луговых трав, на неэродированной почве продуктивность растений от внесения фосфорных удобрений повышается, а на среднеэродированной прибавки иногда не отмечают. Наибольшая урожайность картофеля, яровой пшеницы и луговых трав получается при использовании фосфора в сочетании с азотом и калием на почвах независимо от степени их эродированности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Минеев В.Г.* Экологические проблемы агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 285 с.
2. *Никитишен В.И.* Эколого-агрохимические основы сбалансированного применения удобрений в адаптивном земледелии. М.: Наука, 2003. 183 с.
3. *Heming S.D.* Phosphorus balances for arable soils in Southern England // *Soil Use Manag.* 2007. V. 23. № 2. P. 162–170.
4. *Кочергин А.Е.* Эффективность удобрений на черноземах Западной Сибири // *Агрохимическая характеристика почв СССР: районы Западной Сибири.* М.: Наука, 1968. С. 316–336.
5. *Назарюк В.М.* Почвенно-экологические основы оптимизации питания растений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 364 с.
6. *Антипина Л.П.* Фосфор в почвенном покрове Западной Сибири // *Агрохимия.* 1988. № 5. С. 20–28.
7. *Берхин Ю.И., Чагина Е.Г., Янцен Е.Д.* Фракционный состав минеральных фосфатов почв Западной Сибири // *Агрохимия.* 1984. № 9. С. 21–27.
8. *Богданов Н.И.* Почвы и их плодородие. Омск: ОГИЗ, 1952. 44 с.
9. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Роль природных экосистем в восстановлении плодородия выпашанных почв // *Пробл. агрохим. и экол.* 2017. № 1. С. 43–50.
10. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Фосфатное состояние эродированных лугово-черноземных почв и эффективность фосфорных удобрений в условиях Западной Сибири // *Агрохимия.* 2019. № 6. С. 3–13.
11. *Якутина О.П.* Изменение фосфатного фонда черноземных почв Западной Сибири под влиянием водной эрозии // *Агрохимия.* 2006. № 2. С. 16–21.
12. *Назарюк В.М.* Баланс и трансформация азота в агроэкосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 254 с.
13. *Якутина О.П., Назарюк В.М.* Оценка плодородия эродированных почв юга Западной Сибири // *Агрохимия.* 2007. № 11. С. 10–20.
14. *Гамзиков Г.П., Ильин В.Б., Назарюк В.М.* Агрохимические свойства почв и эффективность удобрений. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1998. 252 с.
15. *Панфилов В.П., Ландина М.М., Каретин Л.Н.* Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. 544 с.
16. *Каптанов А.Н., Ятушенко Е.В.* Агрохимическая характеристика почв склонов. М.: Колос, 1973. 504 с.
17. *Toy T.J., Foster G.R., Renard K.G.* Soil erosion processes: Prediction, measurement, and kontrol. N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 2002. 338 p.
18. *Стрельченко Н.Е.* Фосфатный режим переувлажненных почв Дальнего Востока. Владивосток: Дальневосточн. кн. изд-во, 1982. 143 с.
19. *Назарюк В.М., Кленова М.И., Калимуллина Ф.Р.* Продуктивность и химический состав луговых трав на эродированных почвах лесостепной зоны Западной Сибири // *Агрохимия.* 2015. № 2. С. 52–63.

## **Phosphorus Forms in Eroded Meadow-Chernozem Soils of Western Siberia and Their Role in the Mineral Nutrition of Plants**

**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*

*<sup>#</sup>E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru*

The soil profile showed a significant decrease in the content of organic phosphorus, which is significantly lower in the group of mineral phosphates. As soil erosion increased, the content and reserves of phosphates decreased, especially in the organic group. Changes in the content of mobile forms of phosphorus were also found. In some layers of the humus-accumulative horizon of the non-eroded soil, the content of easily mobile phosphorus was about 2.0–2.5 times higher than in the eroded soil. The content and reserves of mobile and inactive phosphorus in the humus-accumulative horizon were significantly lower than in the illuvial horizons B1 and B2. This is due to the disproportionate formation of mineral phosphates in the soil and their consumption by plants during the growing season, which is due to the specific hydrothermal conditions of the environment. Application of phosphorous fertilizers increased the content of mobile phosphorus in the soil by 22–33% and plant productivity by 19–37%.

*Key words:* eroded soil, humus, forms of phosphorus, fertilizer, plant.