

СОРБЦИЯ ФОСФОРА ПОЧВАМИ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ¹

© 2022 г. С. Б. Сосорова

*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия**E-mail: soelma_sosorova@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.09.2021 г.

После доработки 10.10.2021 г.

Принята к публикации 15.12.2021 г.

Рассмотрена адсорбция фосфора в почвах Западного Забайкалья (Республика Бурятия). В лабораторных условиях определены параметры сорбции фосфат-иона почвой (Q_{\max} – максимумы адсорбции фосфора и K_L – константа адсорбции) в аллювиальных дерновых, аллювиальной темногумусовой, аллювиальных торфянисто-низинных, каштановых почвах. Образцы почв были отобраны по генетическим горизонтам каждого профиля. Изотерма адсорбции фосфат-ионов была разработана для каждого из образцов почвы путем уравнивания 3 г воздушно-сухой почвы с 30 мл раствора KH_2PO_4 (концентрация от 0.25 до 5 мМ $\text{P}_2\text{O}_5/\text{л}$). Параметры сорбции фосфат-иона рассчитаны по уравнениям Ленгмюра и Фрейндлиха, изотермы которых удовлетворительно описывали процесс адсорбции фосфора. Согласно результатам, кислотность и щелочность почвы, гранулометрический состав, содержание органического вещества являются основными факторами, влияющими на адсорбцию фосфора. Относительно высокими поглощениями фосфат-иона характеризуются гумусовые горизонты аллювиальных почв и меньшими – минеральные горизонты. Однако при этом минеральные горизонты связывают фосфат-ион прочнее, чем гумусовые.

Ключевые слова: адсорбция, фосфор, изотерма, почва, механизм поглощения, Западное Забайкалье.

DOI: 10.31857/S0002188122030115

ВВЕДЕНИЕ

В формировании почвенного плодородия важная роль принадлежит фосфору, содержание и запасы которого определяют агрохимические ценные свойства и продуктивность почв в целом. Это связано с тем, что фосфор является одним из важнейших биогенных элементов. Он входит в состав нуклеопротеидов, сахарофосфатов, фосфатидов и других соединений, активно участвует в процессах обмена веществ и синтеза белка, определяет энергетику клетки, влияет на рост растений. Фосфор содержится в почве в различных формах: органической и неорганической, подвижной и неподвижной. Содержание подвижного фосфора в почве – одна из важнейших характеристик ее плодородия [1].

На территории Западного Забайкалья (Республика Бурятия), по данным [2], на 01.01.2016 г. средневзвешенное содержание подвижного фосфора составило 181 мг/кг. По данным автора, из обследованных пахотных 532 тыс. га 5.3% почв характеризовались очень низким и низким содер-

жанием подвижного фосфора, средним – 9.6, повышенным – 12.4, высоким – 13.4 и очень высоким – 59.4%.

Установлено, что целинные и пахотные почвы Западного Забайкалья обладают высоким природным запасом валового фосфора, из которого более 30% находится в форме органических соединений. Минеральные фосфаты в этих почвах представлены преимущественно высокоосновными кальцийфосфатами типа апатита ($\text{Ca}-\text{P}_{\text{III}}$), доля наиболее растворимых фосфатов ($\text{Ca}-\text{P}_I$ и Ca_{III}) незначительная, особенно в верхних горизонтах [3].

В почвах адсорбция фосфора является основным процессом, контролирующим его доступность для растений. В литературе достаточно освещены различные механизмы сорбции фосфатов почвами и особенности этого процесса [4–14]. Однако для почв Западного Забайкалья данные по сорбции фосфатов отсутствуют.

Для оптимизации фосфорного питания растений и сохранения плодородия пахотных почв необходимо понимать, как изменяются их свойства и сорбционная способность в отношении фосфо-

¹ Работа выполнена в рамках финансирования бюджетной темы госзадания № 121030100228-4.

Таблица 1. Агрохимические свойства почв

Почва	Разрез, горизонт	Глубина, см	рН _{Н₂О}	Гумус, %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	P ₂ O ₅	K ₂ O
					мг-экв/100 г		мг/кг (по Мачигину)	
АК (пахотная)	1К А _{пах}	0–22	7.6	0.67	6.8	1.6	27.5	80
	1К В	22–55	8.1	0.29	7.3	2.0	20.0	46
К (целинная)	2К А	0–12	7.8	1.05	8.5	1.5	28.0	76
	2К В	12–22	7.9	0.91	13.1	2.7	64.0	36
ААД (пахотная)	1И–18, А _{пах}	0–25(45)	7.2	1.51	9.6	14.4	162.7	90
	А _{пах} В	25(45)–60	7.1	0.43	4.2	6.3	84.3	52
АД (целинная)	2И–18, А	0–15	7.5	1.08	11.8	11.8	157.3	180
	В	15–26(29)	7.6	0.20	6.2	4.1	10.7	54
АТ (залежь)	АU _{ра}	0–21(24)	5.9	3.95	13.5	12.2	57.5	30
ТН	1 Закалтус	Г 0–28	5.9	4.98	14.4	5.1	28.0	82
	1 Закалтус	28–70	5.8	0.38	9.0	2.5	15.3	64
АТН	2 Закалтус	0–35	5.8	3.95	18.4	4.1	56.0	98
	2 Закалтус	35–86	5.8	0.62	10.8	7.1	17.3	120

Примечание. АК – агрокаштановая, К – каштановая, ААД – агроаллювиальная дерновая, АД – аллювиальная дерновая, АТ – аллювиальная темногумусовая, ТН – аллювиальная торфянисто-низинная, АТН – агроаллювиальная торфянисто-низинная почва.

ра. По мнению [11], изучение сорбционных свойств почв расширяет представления о фосфатном режиме, имеет прикладное значение и будет использоваться в комплексной оценке ее состояния при принятии агрохимических решений.

Цель работы – изучение сорбционных свойств почв по отношению к фосфору. Для этого было проведено в лабораторных условиях исследование закономерностей сорбции фосфат-ионов различными почвами Западного Забайкалья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали образцы аллювиальной темногумусовой постагрогенной (Закаменский р-н, координаты N50.40253", E103.27225"), аллювиальной дерновой (Иволгинский р-н, пригород г. Улан-Удэ, координаты N51.7846", E107.4777"), аллювиальной торфянисто-низинной (Кабанский р-н, с. Закалтус, координаты N52.02166", E106.52333") и каштановой (Иволгинский р-н, координаты N52.023055", E106.54555"). Выбор данных типов почв был обусловлен их значимостью в сельском хозяйстве. Образцы почв отбирали на участках, не подверженных значительному техногенному воздействию.

В образцах определили следующие показатели: содержание гумуса по методу Тюрина со спектрофотометрическим окончанием (ГОСТ 26213-91), рН_{Н₂О} – потенциометрическим методом со

стеклянным электродом (ГОСТ 26483-85), содержание обменных Ca²⁺ и Mg²⁺ – трилометрическим методом (ГОСТ 26483-85), подвижный фосфор по Мачигину – по ГОСТу 26205-91. Фосфор в равновесном растворе определяли колориметрическим методом по Труога–Мейеру [15].

Исследованные пахотные аллювиальная дерновая и каштановая почвы находятся под овощным (картофель, капуста), аллювиальная торфянисто-низинная – под зерновым (на момент исследования – под паром) севооборотом.

Показатели агрохимических свойств исследованных почв приведены в табл. 1. Исследованные почвы характеризовались супесчаным и легкосуглинистым гранулометрическим составом.

Для установления механизма поглощения проведено сравнительное исследование сорбции фосфат-иона почвой в статических условиях в течение 24 ч (рис. 1, 2, 3, 4). Использованы водный раствор КН₂Р_О₄ в концентрациях от 0.25 до 2.5 мМ Р₂О₅/л в соотношении почва : раствор = 1 : 10. Количество сорбированного фосфат-иона было вычислено по разности его содержания в исходных растворах и в фильтратах почвенных суспензий (1):

$$A = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{рав}}V}{m}, \quad (1)$$

где A – количество адсорбированного вещества на единицу массы, мг Р₂О₅/кг, $C_{\text{исх}}$ – начальная концентрация, мМ Р₂О₅/л, $C_{\text{рав}}$ – равновесная

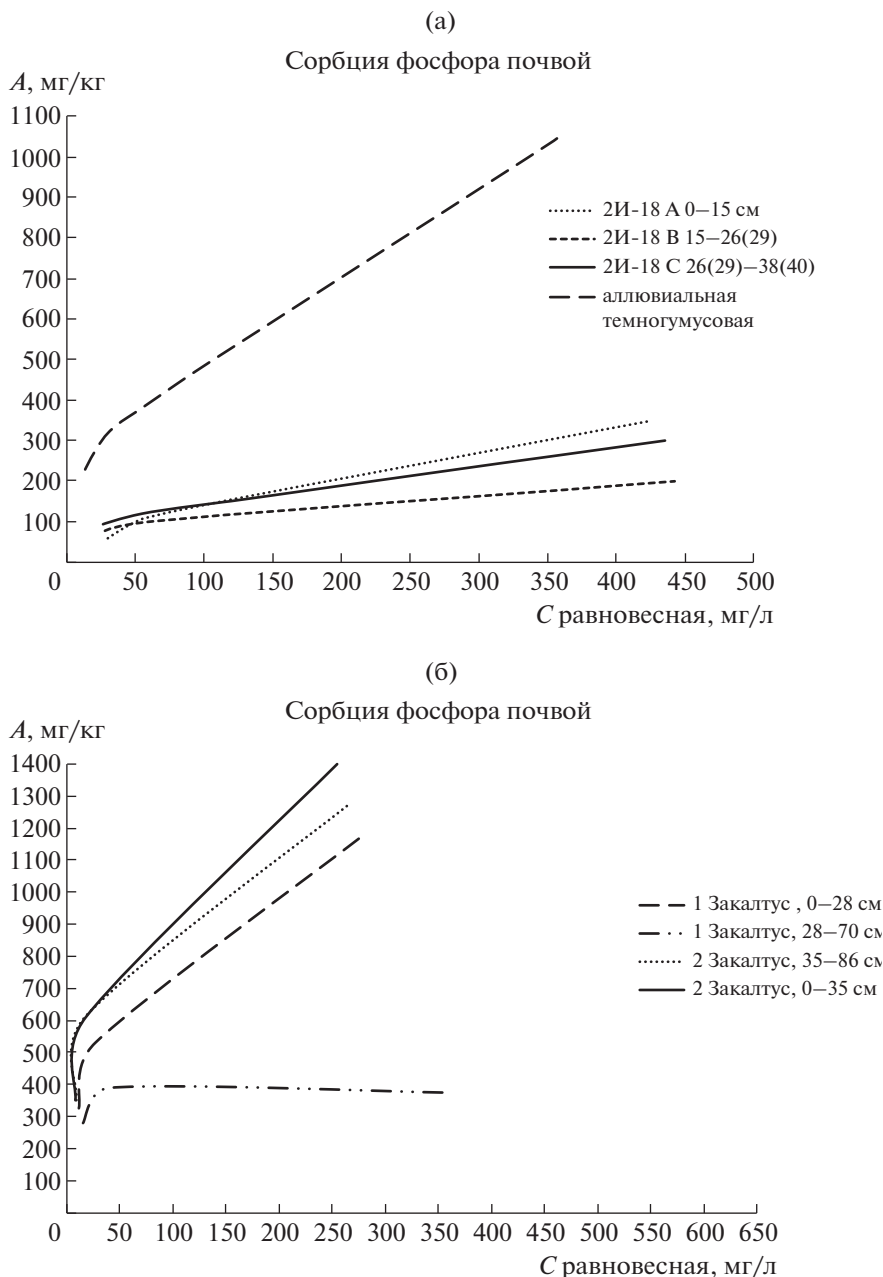


Рис. 1. Изотермы сорбции P_2O_5 : (а) – аллювиальными дерновыми и темногумусовой почвами, (б) – аллювиальной торфянисто-низинной почвой, (в) – агрокаштановой почвой, (г) – агроаллювиальной дерновой и каштановой почвами.

концентрация фосфатов, мг P_2O_5 /л, m – навеска почвы, г.

Данные сорбции фосфат-иона почвой обрабатывали с помощью уравнений изотерм Ленгмюра (2) и Фрейндлиха (3):

$$A = A_{\max} \frac{K_L C_{\text{рав}}}{1 + K_L C_{\text{рав}}} \quad (2)$$

$$A = K_F C^{1/n}, \quad (3)$$

где A_{\max} – максимальная сорбционная емкость, мМ P_2O_5 /л, K_L , K_F – константы сорбционного равновесия, n – постоянная, подобранная опытным путем для наилучшего описания зависимости $A = f(C)$.

Уравнение Фрейндлиха описывает процесс сорбции в узком интервале концентраций и не дает возможность рассчитать максимальную величину поглощения. Уравнение Фрейндлиха при невысоких концентрациях равновесного раство-

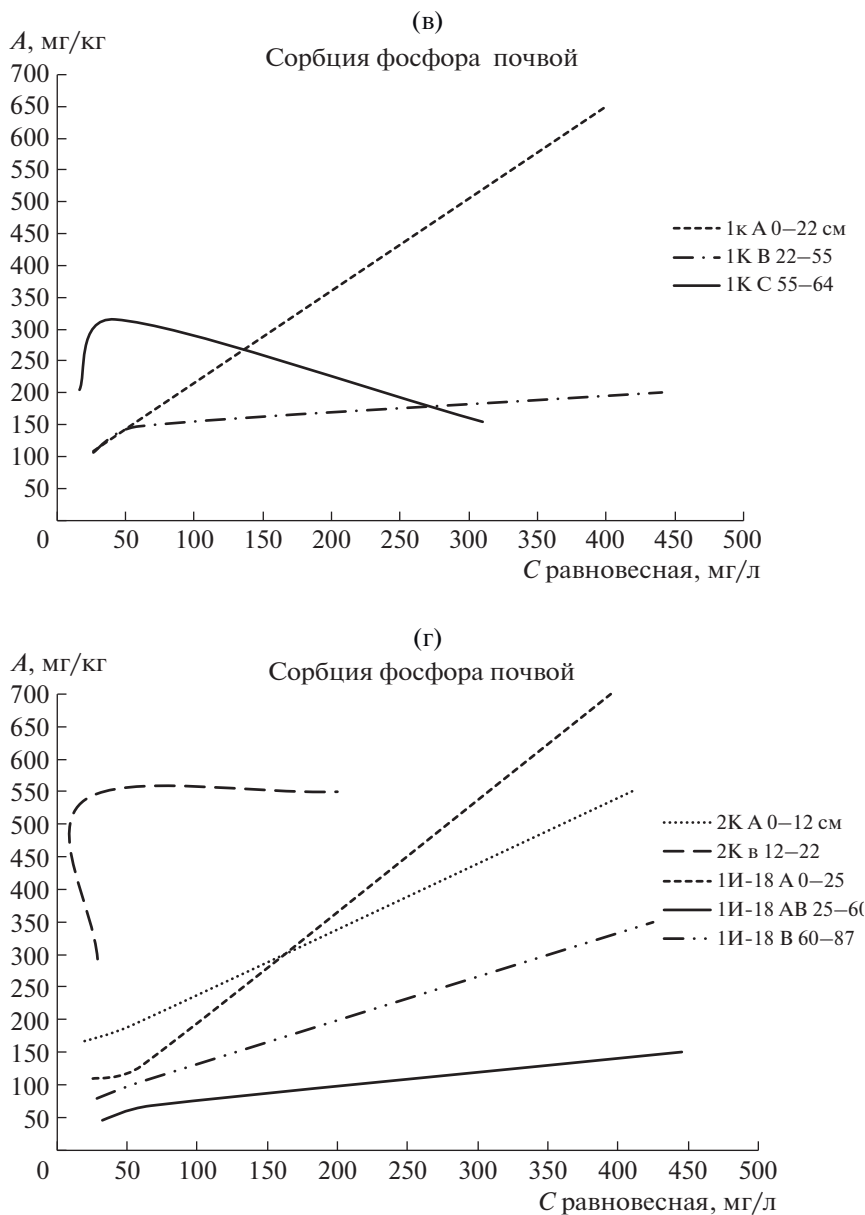


Рис. 1. Окончание.

ра можно рассматривать как частный случай уравнения Ленгмюра.

Полученные данные аппроксимировали моделью ограниченной сорбции на монослое Ленгмюра из преобразованного в линейную форму уравнения (4):

$$\frac{C}{A} = \frac{1}{A_{\max} K_L} + \frac{C_{\text{рав}}}{A_{\max}} \quad (4)$$

Термодинамический потенциал G рассчитывали по формуле (5):

$$\Delta G = -RT \ln K_L \quad (5)$$

и использовали для оценки энергии связи фосфатов с почвой в данной модели.

Для данных образцов строили изотермы сорбции по модели Ленгмюра и рассчитывали максимальную адсорбцию (A_{\max}), константу адсорбции (K_L), энергию связи фосфатов с почвой (ΔG) (табл. 2).

Статистическую обработку провели с использованием программы Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованные почвы характеризуются в основном средним содержанием подвижного фос-

Таблица 2. Параметры сорбции P_2O_5 почвами Западного Забайкалья

Образец. Горизонт	Глубина, см	Почва	Степень сорбции при концент- рации P_2O_5 0.5 мМ/л	Параметры уравнения Ленгмюра				Параметры уравнения Фрейндлиха			
				A_{max} , мМ/кг	K_L , л/кг	R^2	$-\Delta G$, кДж/моль	K_F , л/кг	$1/n$	R^2	Уравнение
1К А	0–22	Агрокаштановая	20.9	8.10	0.4528	0.9182	+1.943	10.967	0.68	0.9907	$10.97C^{0.68}$
1К В	22–55		19.9	1.49	5.5049	1.0	4.183	57.597	0.21	0.9364	$57.60C^{0.21}$
2К А	0–12	Каштановая	26.0	4.70	1.4482	0.9696	0.908	43.281	0.41	0.9509	$43.28C^{0.41}$
2К В	12–22		72.6	4.20	8.4433	0.9814	5.232	1098.25	–0.31	0.7509	$1098.2597C^{-0.31}$
1 И–18 Апах	0–25	Агроаллювиаль- ная дерновая	17.6	10.89	0.2877	0.6089	+3.055	8.902	0.72	0.9482	$8.90C^{0.71}$
1И–18 АпахВ	25–60		9.1	1.32	1.2858	0.9987	0.616	9.313	0.45	0.9958	$9.31C^{0.45}$
2И–18 А	0–15	Аллювиальная дерновая	15.5	3.91	0.5733	0.9986	+1.364	25.93	0.30	0.7661	$25.93C^{0.30}$
2И–18 В	15–26(29)		13.8	1.61	2.1540	0.9971	1.882	25.52	0.34	0.9996	$25.52C^{0.34}$
2И–18 С	26(29)– 38(40)		16.5	2.31	3.7619	0.9813	3.242	22.44	0.42	0.9941	$22.44C^{0.42}$
Фон АУра	0–21(24)	Аллювиальная темногумусовая	46.6	8.81	1.7128	0.9873	1.319	70.91	0.44	0.9989	$70.91C^{0.44}$
1 Закалтус	0–28	Аллювиальная торфянисто- низинная	66.3	10.06	3.4622	0.9997	3.046	133.81	0.39	0.9843	$133.81C^{0.39}$
1Закалтус	28–70		48.8	2.66	62.65	0.9997	10.148	253.51	0.07	0.4297	$253.51C^{0.07}$
2 Закалтус	0–35	Агро-аллюви- альная торфя- нисто-низинная	76.3	11.74	4.4586	1.0	3.666	166.76	0.39	0.9625	$166.76 C^{0.39}$
2 Закалтус	35–86		76.9	10.06	5.4898	0.9999	4.176	184.93	0.35	0.9407	$184.93 C^{0.35}$

фора, за исключением аллювиальной дерновой почвы, где его содержание оценено как очень высокое (табл. 1).

Относительно повышенное содержание фосфора выявлено в верхнем слое почв, что обусловлено, с одной стороны, извлечением P_2O_5 растениями из нижних горизонтов, минерализацией в дальнейшем растительных остатков и слабой способностью образовавшихся фосфатов к передвижению (фосфаты накапливаются в верхних горизонтах [16]), с другой – внесением в пахотный слой почв органических и минеральных удобрений.

Предполагается, что за фиксацию фосфора почвой ответственны, вероятно, 3 отдельных механизма, которые перекрывают друг друга. При рН от 2.0 до 5.0 ед. удерживание фосфора проис-

ходит главным образом за счет постепенного растворения оксидов Fe и Al, которые повторно осаждаются в виде фосфатов. При рН от 4.5 до 7.5 фосфор фиксируется на поверхности глинистых минералов, а при рН от 6.0 до 10.0 фосфор осаждается двухвалентными катионами. Нет установлено единого механизма, отвечающего за фиксацию фосфора во всех почвах [17].

Изотерма сорбции фосфатов является важнейшей сорбционной характеристикой почвы, т.к. не только выражает зависимость $Q = f(C_p)$, но и отражает условия сорбционного процесса [12]. Выпуклая изотерма указывает на то, что сорбционный процесс проходит в наиболее благоприятных условиях, например, при большой энергии взаимодействия фосфатов с почвой или отсутствии

других компонентов, конкурирующих за сорбционные места. Линейные изотермы отмечены, как правило, при относительно малых концентрациях растворов фосфатов, а также в случаях, когда в сорбционном процессе участвуют другие одинаковые по конкурирующей способности или по сорбционной связи компоненты [18].

Полученные экспериментальные изотермы сорбции P_2O_5 в диапазоне исследованных концентраций (рис. 1) в целом относятся к L-типу по Джайлсу, что характеризует высокое сродство поверхности к сорбируемому веществу при его низких концентрациях [19]. При невысоких концентрациях фосфат-ионов в исходных растворах они интенсивно поглощаются почвой. И только при увеличении концентрации фосфат-ионов в исходных растворах происходит относительное насыщение поверхности почвы ими, и дальнейшая сорбция протекает согласно уравнению Ленгмюра, что следует из монотонного возрастания конечных частей кривых. Однако при концентрации $>5-7$ мМ $P_2O_5/л$ дальнейшее поглощение фосфат-ионов резко снижается.

В работе [20] показано, что на первой стадии сорбции поглощение фосфатов носит химический характер и идет по мономолекулярному типу. По этим данным, время установления сорбционного равновесия изменялось от 0.19 до 0.53 ч в зависимости от генетического горизонта. Начиная с 30 мин, кинетика сорбции была обусловлена диффузией фосфата внутрь почвенных частиц.

В работе [21] отмечено, что поверхностно сорбированные фосфаты образуются в течение первых 5–10 мин взаимодействия почвы с монофосфатами кальция при низкой концентрации. После насыщения поверхности почвенных частиц процесс идет медленно за счет диффузии фосфора в межпакетное пространство глинистых минералов до наступления сорбционного равновесия.

Величины рассчитанных параметров сорбции фосфора различались, что было связано с различием свойств исследованных почв (табл. 2). Например, в работах [22, 23] отмечено, что сорбция фосфора почвами зависит от ряда свойств почвы, важнейшими из которых являются величина pH, присутствие глины, органического вещества, величина катионообменной емкости, наличие $CaCO_3$, аморфных оксидов Fe, Al и Mn, аллофанов, гетитов, а также Fe и Al на поверхности гуминовых веществ. Как оксианион, фосфат образует устойчивый межсферический поверхностный комплекс с функциональными группами почвенных минералов.

Кроме этого, сорбция фосфора определяется составом твердой фазы почвы, она прямо пропорциональна содержанию илстой фракции и несиликатных соединений железа и обратно пропорциональна содержанию органического вещества [24].

В работе [25] установлено, что адсорбция фосфора почвами имеет высокую степень связи с величиной pH, содержанием свободного и аморфного Fe, но не с содержанием кристаллического Fe и органического углерода. Было показано, что крутизна графика адсорбции P значительно уменьшалась ($P < 0.001$) с увеличением показателя pH. По данным этих авторов, максимальная адсорбционная способность фосфора варьировалась в зависимости от фоновой концентрации фосфора в почвах и составляла от 617 до 1481 мг/г, когда наибольшая адсорбционная способность отмечена в карбонатной почве, а наименьшая – в очень кислой почве Пьемонта. Энергия адсорбции была максимальной (1.80 мкг/мл) в почве предгорий и наименьшей (0.75 мкг/мл) – в карбонатной почве.

Адсорбционные параметры почв показали хорошую взаимосвязь между собой. Рассчитанный коэффициент корреляции между A_{max} и величиной pH оценен как отрицательный средний ($r = -0.57$), A_{max} и органическим веществом – положительный средний ($r = 0.68$) и между A_{max} и содержанием подвижного P_2O_5 – как слабый ($r = 0.17$).

Следует отметить, что генетические особенности исследованных почв определяют их различия в объемах поглощенного фосфора. Например, наиболее высокими сорбционными свойствами по отношению к минеральному фосфору обладают агроаллювиальные торфяно-низинные почвы. Данными почвами поглощается от 48.8 до 76.9% внесенных фосфат-ионов при концентрации 0.5 мМ $P_2O_5/л$ (табл. 2).

Различие в поглощении фосфора почвами подтверждены данными других исследователей [5, 26–29]. Показано [26], что количество поглощенного фосфора серыми лесными почвами может изменяться от 500 до 1800 мг $P_2O_5/кг$ почвы или 3.5–12.7 мМ $P_2O_5/кг$. По данным [5], емкость поглощения фосфат-ионов изменяется от 800 мг $P_2O_5/кг$ в песчаных дерново-подзолистых, 3000 мг/кг – в глинистых черноземах до 30 000 мг P_2O_5 мг/кг сухого торфа – в торфяно-болотной низинной почве.

При исследовании тропических почв Гвинеи, дерново-подзолистых и аллювиальных почв России установили [27], что наибольшей величиной поглощения фосфат-ионов характеризовалась

аллювиальная почва, которая сорбировала до 5000 мг P_2O_5 кг или 35.2 мМ P_2O_5 /кг почвы. По сравнению с аллювиальной почвой сорбция фосфат-ионов ферралитовой почвой была меньше: 3000–3880 мг P_2O_5 /кг. Дерново-подзолистой почвой сорбировалась до 2400 мг P_2O_5 /кг, что было больше полученных нами данных. При этом дерново-подзолистая почва характеризовалась большей доступностью поглощенных фосфатов. Данное различие в поглощении фосфат-ионов объясняется разницей в степени окристаллизованности полуторных окислов и минералогическим составом. Например, минералогический состав исследованных аллювиальных почв представлен смешанно-слоистыми минералами, а ферралитовых почв — преимущественно гидроксидными железа и алюминия.

В работе [29] отмечено, что почвы с высоким содержанием глины, содержащие оксиды и гидроксиды Al и Fe обладают высокой сорбционной способностью по отношению к фосфору, что приводит в свою очередь к снижению его подвижности и дефициту фосфора в почвах.

Показано, что величина Q_{max} в органогенных горизонтах агроаллювиальной торфяно-низинной почвы менялась в пределах 10.1–10.9 мМ/кг P_2O_5 , в нижележащих горизонтах она была меньше — 2.6–10.1 мМ/кг P_2O_5 (табл. 2). Эти данные согласовались с результатами исследования [28], где было установлено, что типичная низинная торфяная почва обладает высокой поглотительной способностью по отношению к фосфат-ионам и характеризуется слабой интенсивностью перехода фосфат-ионов из твердой фазы в раствор. Однако в работе [30] подчеркнута, что поглощение P_2O_5 гумусом значительно меньше, чем полуторными окислами и щелочноземельными основаниями, в связи с чем увеличение содержания гумуса в почве уменьшает ее поглотительную способность. Это возможно связано с тем, что органические вещества почвы способствуют растворению фосфатов.

По данным [31], влияние органического вещества на динамику содержания фосфора в почве проявляется двояко: посредством снижения сорбционной способности почв по отношению к фосфору и как прямой источник фосфатов, образующихся при минерализации фосфорорганических соединений. Например, при исследовании фосфатного состояния пахотных горизонтов эрозивно-деградированных агродерново-подзолистых почв было установлено, что органические и органо-минеральные фракции пахотных горизонтов несмытых почв характеризуются низкой

сорбционной способностью по отношению к фосфат-иону ($P_{сорб} = 96.1 \pm 0.5$ мг/кг почвы) по сравнению с эродированными почвами. Показано, что гумусовым горизонтом агроаллювиальной темногумусовой почвы поглощалось 46.6% от внесенного P_2O_5 , других почв — 15.5–26.0% (табл. 2).

В пахотных почвах величины A_{max} P_2O_5 были больше, чем в целинных (табл. 2). В работе [20] было установлено, что наибольшее количество фосфора поглощалось почвами высокой степени окультуренности и с низкой обеспеченностью подвижными соединениями фосфора. При этом объем сорбированного фосфора изменялся пропорционально величине дозы P-удобрений. При одинаковой их дозе он снижается с повышением содержания фосфатов в почве [5]. Например, в работе [33] отмечено, что сорбционная способность карбонатных почв, куда вносили фосфаты в виде органического удобрения (навоз КРС) в течение 25 лет, в целом была меньше, чем неудобранных почв. В работе [34] установили, что с увеличением концентрации фосфора в почве величины K_L и A_{max} уменьшались, тогда как степень сорбции фосфора увеличивалась.

Выявлено, что в пахотных горизонтах величины энергии связи фосфатов с почвой меньше, чем в подпахотных (минеральных) горизонтах (табл. 2). Согласно [35], величина $\Delta G > 0$ свидетельствует о неустойчивости образующихся органофосфатных соединений. Уменьшение энергии связи фосфатов с почвой можно объяснить увеличением количества пленок органического вещества на поверхности тех минералов, в основном несиликатного железа, которые являются основными агентами прочного связывания фосфатов. При этом органическое вещество и фосфаты являются конкурентами в борьбе за сорбционные места. Поэтому чем больше доза и длительность внесения P-удобрений, тем меньше остается активных сорбционных позиций и тем больше доступность фосфора для растений [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные параметры сорбции фосфат-иона свидетельствовали о различии поглотительной способности почв по отношению к фосфат-ионам в зависимости от их генетических особенностей и свойств. Изотермы сорбции фосфат-иона указывали на высокое сродство почвенного поглощающего комплекса к исследованному иону. Относительно высоким поглощением фосфат-иона характеризовались гумусовые горизонты аллювиальных почв и меньшим — минеральные горизонты. Однако при этом мине-

ральные горизонты связывали фосфат-ион прочнее, чем гумусовые.

По сравнению с целинными пахотные почвы характеризовались высокой сорбционной способностью по отношению к фосфат-иону, сорбционные характеристики менялись в сторону увеличения прочности связывания фосфат-иона, уменьшения количества доступного растениям фосфора. Характеристики сорбции фосфат-иона изученными почвами могут быть использованы при оценке их фосфатного состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шеуджен А.Х.* Биогеохимия. Майкоп: ГУРИПП “Адыгея”, 2003. 1028 с.
2. *Запханов Ю.Д.* Динамика плодородия пахотных почв Республики Бурятии // Достиж. науки и техн. АПК. 2016. Т. 30. № 10. С. 77–80.
3. *Мангатаев Ц.Д., Пьянкова Н.А., Рузавин Ю.Н.* Содержание фосфатов в целинных и пахотных почвах Западного Забайкалья // Докл. РАСХН. 2008. № 4. С. 27–30.
4. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы. М.: Высш. шк., 1968. 428 с.
5. *Господаренко Г.М.* Агрохимия. Учеб. пособ. К.: ИАЕ, 2010. 400 с
6. *Елешев Р.Е., Иванов А.Л., Айтхожаева Т.А.* Фосфатный режим орошаемых карбонатных почв Юго-Восточного Казахстана и его изменение в связи с применением удобрений. Сообщ. 2. Сорбция фосфатов почвами // Агрохимия. 1986. № 8. С. 24–31.
7. *Иванов А.Л., Елешев Р.Е.* Фосфатный режим орошаемых карбонатных почв Юго-Восточного Казахстана и его изменение в связи с применением удобрений. Сообщ. 1. Качественный состав фосфатного фонда орошаемого светлого серозема и эффективность фосфорных удобрений на искусственно созданных фосфатных фонах // Агрохимия. 1986. № 2. С. 25–29.
8. *Иванова С.Е., Логинова И.В., Тиндалл Т.* Фосфор: механизмы потерь из почвы и способы их снижения // Питание растений. 2011. № 2. С. 9–12.
9. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 264 с.
10. *Орлов Д.С.* Химия почва. М.: Изд-во МГУ, 1985. 376 с.
11. *Рогова О.Б., Колобова Н.А., Иванов А.Л.* Сорбционная способность серой лесной почвы в отношении фосфора в зависимости от системы удобрения // Почвоведение. 2018. № 5. С. 573–579.
12. *Фокин А.Д.* Изотермы сорбции фосфатов на подзолистой почве // Докл. ТСХА. 1963. Вып. 89. С. 230–236.
13. *Jentsch S.* Phosphate dynamics in soil <https://www.researchgate.net/publication/351250696>. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16937.52328>. Дата обращения 18.06.2021.
14. <http://racechrono.ru/transformaciya-pochv/5287-sorbciya-fosfatov-nafosfatirovannyh-pochvennyh-overhnostyah.html>.
15. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
16. *Чумаченко И.Н.* Фосфор в жизни растений и плодородии почв. М.: ЦИНАО, 2002. 124 с.
17. *Sato S., Comerford N.B.* Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid brazilian Ultisol // Rev. Bras. Ciênc Solo. 2005. V. 29. P. 685–694.
18. Агроэкологические особенности трансформации фосфатов в дерново-подзолистой почве при загрязнении ее тяжелыми металлами // studexpo.ru/1216657/selskoe_hozyaystvo/agroekologicheskie_osobennosti_transformatsii_fosfatov_dernovo_podzolistoy_pochve_zagryaznenii_tyazhyolyymi
19. *Соколова Т.А., Трофимов С.Я.* Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен. Тула: Гриф и К, 2009. 174 с.
20. *Тесфайе Дерссех Ешету.* Агроэкологические особенности трансформации фосфатов в дерново-подзолистой почве при загрязнении ее тяжелыми металлами: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2009. 23 с.
21. *Антипина Л.П.* Фосфор в почвах Сибири: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Омск, 1991. 34 с.
22. *Кизас Д., Лазаридис Н.* Процессы и факторы, влияющие на сорбцию фосфора в почвах // <https://www.intechopen.com/books/sorption-in-2020s/processes-and-factors-affecting-phosphorus-sorption-in-soils>
23. *Antoniadis V., Koliniati R., Golia E., Petropoulos P.* Effect of soil properties on phosphorus sorption in 13 soils with varying degree of weathering // Почвовед. и агрохим. 2014. № 4. С. 63–68.
24. *Хелленурме В.А.* О сорбции фосфатов бурой типичной и бурой псевдоподзолистой почвами // Почвоведение. 1974. № 9. С. 88–93.
25. *Masud M.M., Moniruzzaman M., Shil N.C., Islam M.R., Saleque M.A.* Phosphorus sorption characteristics in some calcareous, non-calcareous and acid piedmont soils of Bangladesh // Bull. Inst. Trop. Agr. Kyushu Univ. 2006. V. 29. P. 55–68.
26. *Галеева Л.П.* Физико-химические свойства и фосфатный режим серых лесных почв в агроценозах // Агрохимия. 2010. № 11. С. 13–20.
27. *Диалло Т.Б.* Сорбция фосфат-ионов тропическими и дерново-подзолистыми почвами и влияние фосфорного удобрения на урожай ячменя: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.—Пушкин, 1993. 27 с.
28. *Кемаев А.И.* Трансформация фосфора удобрения в осушенных низинных торфяных почвах: Дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.—Пушкин, 2000. 176 с.
29. *Chimdi A., Gebrekidan H., Tadesse A., Kibret K.* Phosphorus sorption patterns of soils from different land use systems of East Wollega, Ethiopia // Amer.-Euras. J. Sci. Res. 2013. № 8(3). P. 109–116. <https://doi.org/10.5829/idosi.aejr013.8.3.12056>

30. Макаров М.И. Соединения фосфора в гумусовых кислотах почвы // Почвоведение. 1997. № 4. С. 458–466.
31. Артемьева З.С. Роль органических и органо-минеральных составляющих в формировании фосфатного режима пахотных горизонтов эрозийно-деградированных агродерново-подзолистых почв // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 78. С. 70–86.
32. Савич В.И., Ларешин В.Г., Кулибали С. Фосфатная буферная способность почв Мали // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1991. Вып. 52. С. 51–54.
33. Whalen J.K. Chang phosphorus sorption capacities of calcareous soils receiving cattle manure applications for 25 years // Commun. Soil Sci. Plant. 2002. V. 33. P. 1011–1026.
34. Wang R. Guo S., Li N., Li R., Zhang Y., Jiang J. Phosphorus accumulation and sorption in calcareous soil under long-term fertilization // PLoS ONE. 2015. №10(8): 135160. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135160>
35. Спозито Г. Термодинамика почвенных растворов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 237 с.

Phosphorus Sorption by Soils of Western Transbaikal

S. B. Sosorova

Institute of General and Experimental Biology SB RAS

ul. Sakhyanovoy 6, Ulan-Ude 670047, Russia

E-mail: soelma_sosorova@mail.ru

Phosphorus adsorption in soils of Western Transbaikalia (Republic of Buryatia) is considered. The parameters of phosphate ion sorption by soil (Q_{\max} – phosphorus adsorption maxima and K_L – adsorption constant) in alluvial turf, alluvial dark humus, alluvial peat-lowland, chestnut soils were determined in laboratory conditions. Soil samples were selected according to the genetic horizons of each profile. The phosphate ion adsorption isotherm was developed for each of the soil samples by balancing 3 g of air-dry soil with 30 ml of KH_2PO_4 solution (concentration from 0.25 to 5 mM $\text{P}_2\text{O}_5/\text{l}$). The parameters of the phosphate ion sorption were calculated according to the Langmuir and Freundlich equations, whose isotherms satisfactorily described the process of phosphorus adsorption. According to the results, the acidity and alkalinity of the soil, the granulometric composition, the content of organic matter are the main factors affecting the adsorption of phosphorus. Relatively high phosphate ion uptake is characterized by humus horizons of alluvial soils and smaller mineral horizons. However, mineral horizons bind phosphate ion more strongly than humus horizons.

Key words: adsorption, phosphorus, isotherm, soil, absorption mechanism, Western Transbaikalia.