

УДК 631.414.3

СОРБЦИЯ ФОСФОРА ЗАСОЛЕННЫМИ ПОЧВАМИ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

© 2023 г. С. Б. Сосорова^а, *, М. Г. Меркушева^а, Л. Н. Болонева^а, И. Н. Лаврентьева^а^аИнститут общей и экспериментальной биологии СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: soelma_sosorova@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2022 г.

После доработки 26.05.2023 г.

Принята к публикации 27.05.2023 г.

В статических условиях изучена сорбция фосфора солончаками сухостепной зоны Республики Бурятия из водного раствора KH_2PO_4 в диапазоне концентрации от 0.25 до 5.0 мМ Р/л. Время взаимодействия 24 ч при соотношении почва : раствор 1 : 10. Количество сорбированного фосфора вычисляли по разности его содержания в исходных растворах и в фильтратах почвенных суспензий. По экспериментальным данным построили изотермы адсорбции фосфора почвой и рассчитывали параметры сорбции по уравнениям Ленгмюра и Фрейндлиха. Относительно высокими сорбционными свойствами по отношению к фосфору обладают солончаки типичный и квазиглеевый. Значение максимальной емкости адсорбции (A_{\max}) в гумусовых горизонтах данных почв изменялось в пределах 23.04–42.74 мМ Р/кг, в нижележащих горизонтах – 16.26–30.39 мМ Р/кг. В целом все почвы, за исключением солончака сорового, имели значение A_{\max} в пределах 17.70–42.74 мМ Р/кг. Низкое сорбционное значение фосфора выявлено у солончака сорового. Константа адсорбции Ленгмюра (K_L) варьировала в пределах 0.3–14.0 л/мМ. Солончаки темный и типичный наиболее прочно связывают фосфор. Коэффициент Фрейндлиха (K_F) в изученных почвах изменялся в гумусовом горизонте от 5.34 до 63.43 ммоль Р/кг, в минеральных от 1.74 до 22.68 ммоль Р/кг. Коэффициент распределения (K_d) колебался в пределах 1.95–145.04 л/кг с высокими значениями для солончака квазиглеевого и низкими для солончака сорового. Корреляция между K_d и A_{\max} оценивалась как средняя ($r = 0.51$), K_d и K_L – высокая ($r = 0.84$, $p \leq 0.05$). Исследуемые почвы по значениям SPR (количество фосфора, которое должно быть сорбировано почвой для поддержания концентрации $P = 0.2$ мг/кг (0.0065 мМ/л) в почвенном растворе) от 0.0723 до 3.4836 мМ/кг относятся к слабо сорбирующим фосфор. По способности сорбировать фосфор почвы образуют следующий убывающий ряд: солончак квазиглеевый > солончак типичный > солончак темный > солончак глеевый > аллювиальная светлогумусовая засоленная > солончак соровый.

Ключевые слова: фосфат-ионы, адсорбция, уравнение Ленгмюра, уравнение Фрейндлиха, Solonchaks

DOI: 10.31857/S0032180X22601414, **EDN:** ULLZWW

ВВЕДЕНИЕ

Фосфор – один из основных элементов питания растений, определяющий почвенное плодородие. В растительном организме он играет существенную роль в процессах превращения энергии, биосинтеза и транспорта углеводов, функционировании различных ферментативных систем [18].

Количество и формы фосфора в почвах в той или иной степени зависят от почвообразующих пород. Преобладающая часть фосфорсодержащих соединений (до 95%) в них представлена апатитовыми минералами, из которых наиболее распространен фторапатит. Остальную часть составляют фосфаты R_2O_3 . В насыщенных основаниями почвах фосфор находится в виде малорастворимых фосфатов кальция, магния и гидроксилпа-

тита. В кислых же почвах он вступает в соединения с железом и алюминием (Маккелви (1977), цит. по [10]).

Валовое содержание фосфора в различных почвах существенно варьирует в зависимости от состава почвообразующей породы, гранулометрического состава и степени выраженности биогенной аккумуляции. Обычно оно составляет 0.01–0.35% P_2O_5 , а в низинных торфяно-болотных почвах может достигать и до 1.70% P_2O_5 [7].

В Забайкалье общее содержание, формы и распределение фосфора по почвенному профилю, а также процессы превращения и динамики фосфорсодержащих соединений наиболее изучены в зональных почвах [1, 4, 5, 14–16, 30]. Однако нет достаточной информации о сорбционной спо-

способности почв по отношению к фосфору, за исключением работ [25, 26].

Общая площадь засоленных почв в России по подсчетам [21] составила 66.441 млн га (3.9% от земельного фонда России), из них на сельскохозяйственные угодья приходится 39.2 млн га или 21.4% от площади сельскохозяйственных угодий. По данным [9], 4.5 млн га засоленных почв заняты под пашни.

Солончаки на территории России распространены в аридных зонах Поволжья, Северного Кавказа, юга Западной и Восточной Сибири. Каждый регион характеризуется определенными особенностями свойств и химизма засоления [20].

В Западном Забайкалье солончаки занимают надпойменные террасы, незаливаемые равнинные и прибрежные территории, прилегающие к содово-соленым озерам, а также пониженные участки пойм с неглубоким залеганием минерализованных грунтовых вод. Общая их площадь в структуре почвенного покрова сельскохозяйственных угодий Республики Бурятия составляет 27.17 тыс. га. Основное использование солончakov под чиевыми ассоциациями – пастбищное (79.5%), под сенокосами занято 11.9% [32].

В сухостепной зоне Западного Забайкалья наиболее распространены сульфатный, сульфатно-содовый, сульфатно-хлоридно-содовый, хлоридно-сульфатно-содовый и содовый типы засоления [31].

Солончаки Забайкалья, наряду с каштановыми почвами, являются приоритетными объектами охраны почв согласно Национальной стратегии сохранения биоразнообразия России [19].

Засоление почвы значительно снижает поглощение минеральных питательных веществ, особенно фосфора. Следовательно, солюбилизация или удобрение фосфором необходимы для роста растений, что может быть полезно для смягчения солевого стресса за счет преодоления способности почвы связывать фосфор [41].

Проведенные многолетние исследования [12, 28] показали, что минеральные удобрения на засоленных почвах (солончаки хлоридно-сульфатного и сульфатного, солонцы содово-хлоридного, сульфатно-содового типов засоления с различной степенью засоления) повышают уровень плодородия, что способствует увеличению продуктивности многолетних трав разной степени солеустойчивости. Эффективным приемом повышения урожайности сеяного травостоя и естественных кормовых угодий на засоленных почвах является использование азотно-фосфорных минеральных удобрений в дозах по 60 кг/га действующих веществ. Продуктивность многолетних трав от применения азотных и азотно-фосфорных удобрений повышается в 1.5–3.5 раза.

Однако отсутствуют данные по сорбционным свойствам засоленных почв по отношению к макроэлементам. В этой связи актуальным является изучение сорбционных свойств засоленных почв по отношению к фосфору.

Цель исследований – изучение сорбционных свойств засоленных почв Западного Забайкалья по отношению к фосфат-ионам.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования – солончаки соровый, типичный, темный, квазиглеевый и глеевый, аллювиальная светлогумусовая засоленная, формирующиеся в днищах мезозойских котловин Забайкальского типа геоморфологической области Забайкальского среднегорья: Удинской, Иволгинской, Оронгойской, Гусиноозерской, Боргойской [31].

Исследования проводили в 2010–2012, 2022 гг. в сухостепной зоне на территории Заиграевского, Селенгинского, Иволгинского и Джидинского административных районов Республики Бурятии (рис. 1).

Классификация почв дана согласно [11] и рекомендациям Герасимовой с соавт. [6].

Разрез 14 ($h = 564$ м над ур. м., $52^{\circ}02.252' N$, $108^{\circ}36.640' E$) заложен на берегу озера Гуджирное (Заиграевский район). Растительность отсутствует. Почва – солончак соровый содово-хлоридно-сульфатный (Sodic Solonchaks (Alcalic, Arenic, Sulfatic)).

Разрез 13 ($h = 554$ м на ур. м., $52^{\circ}01.857' N$, $108^{\circ}25.201' E$) под чиево-разнотравным сообществом. Почва – солончак типичный хлоридно-сульфатно-содовый (Calcic Sodic Solonchaks).

Разрез 4 ($h = 505$ м над ур. м., $51^{\circ}46.375' N$, $107^{\circ}22.845' E$) заложен в окрестностях села Хубисхал Иволгинского района в 300 м на В–ЮВ от фермы. Чиевое сообщество. Почва – аллювиальная светлогумусовая засоленная. Fluvisols (Albic, Salic).

Разрез 3 ($h = 505$ м над ур. м., $51^{\circ}46.423' N$, $107^{\circ}22.828' E$) заложен в окрестностях села Хубисхал Иволгинского района в 300 м от разреза 4 под чиевым сообществом. Почва – аллювиальная светлогумусовая засоленная. Fluvisols (Albic, Salic).

Разрез 5 (Р.2-2022 г.) ($h = 562$ м над ур. м., $51^{\circ}32.722' N$, $107^{\circ}2.592' E$) заложен у правого борта озера Белое (Иволгинский район) под чиево-твердоватоосоково-разнотравным сообществом. Почва – солончак квазиглеевый сульфатный (Solonchaks (Loamic, Sulfatic)).

Разрез 1-2022 г. ($h = 493$ м над ур. м., $51^{\circ}32.16' N$, $107^{\circ}01.350' E$) заложен в 100 м на восток от Итигиловского источника на равнине, прилегающей к озеру Белому (Иволгинский район) под ирисово-чиево-твердоватоосоковым сообществом. Почва –

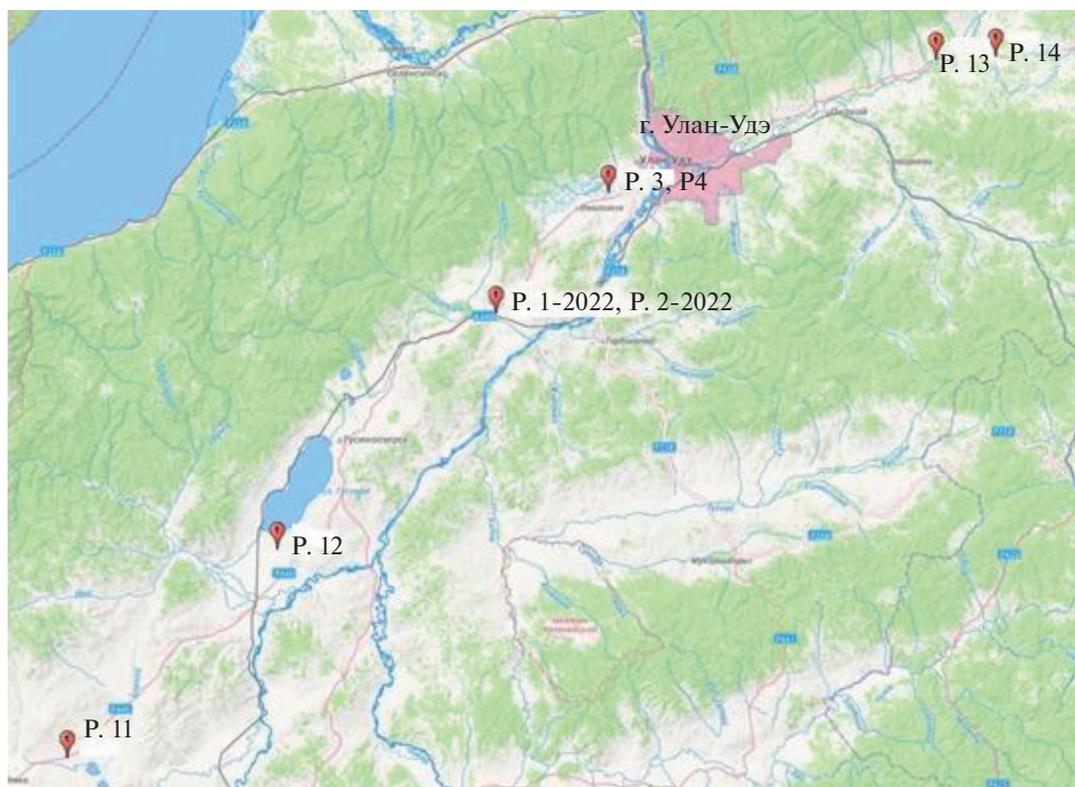


Рис. 1. Картограмма расположения почвенных разрезов солончаков.

солончак типичный сульфатно-хлоридно-содовый (Calcic Sodic Solonchaks (Loamic, Carbonatic)).

Разрез 12 ($h = 549$ м над ур. м., $51^{\circ}4.162' N$, $106^{\circ}19.746' E$) заложен в пойме реки Баян-Гол (Селенгинский район) под ирисово-китайско-леймусовым сообществом. Почва – солончак темный сульфатный (Solonchaks (Arenic, Sulfatic, Humic)).

Разрез 11 ($h = 639$ м над ур. м., $50^{\circ}39.221' N$, $105^{\circ}39.631' E$) заложен на северном берегу оз. Каменный ключ (Джидинский район) в 150 м от уреза воды под солончаковоползунковым сообществом. Почва – солончак глеевый хлоридно-сульфатно-содовый (Sodic Gleyic Solonchaks (Loamic, Carbonatic)).

Характеристика некоторых свойств почв представлена в табл. 1 и ранее опубликованных работах [27, 29]. Исследуемые почвы характеризуются щелочной и сильнощелочной реакцией среды, вариабельностью гранулометрического состава, емкостью катионного обмена, содержания карбонатов, подвижного фосфора и калия. Содержание гумуса и азота невысокое (табл. 1). Данные почвы также различались по степени и химизму засоления.

В целом буферная способность солончаков, по данным [17], в верхней части профиля по отношению к элементам, подвижным в щелочной среде, оценивается как низкая, а к элементам, подвиж-

ным в кислой среде – средняя. В нижележащих горизонтах буферность увеличивается за счет карбонатов и утяжеления гранулометрического состава, за исключением почв разрезов 1, 12, 13 и 14, где отмечается снижение буферности за счет облегчения гранулометрического состава и уменьшения содержания карбонатов. По произведенным расчетам буферность исследуемых почв по отношению к элементам, подвижным в кислой среде в гумусовом горизонте, оценивается от средней до повышенной, и как низкая по отношению к элементам, подвижным в щелочной среде (по градации Ильина, 1995).

Сорбционная функция исследуемых почв, согласно балльной оценке с учетом таких показателей, как ЕКО и мощность гумусового горизонта [36], оценивается от очень низкой (<4 баллов – солончак соровый (разрез 14), глеевый (разрез 11) и квазиглеевый (разрез 5 (P.2-2022)) до средней (5 баллов – солончак типичный (разрез 13), темный (разрез 12)). Для аллювиальной светлогумусовой засоленной почвы сорбционная функция оценивается как низкая (4 балла).

В работе [31] отмечено, что региональной особенностью исследуемых галоморфных почв является сочетание контрастных и часто противоположных элементарных почвенных процессов, формирующих профиль и определяющих их свойства.

Таблица 1. Характеристика свойств засоленных почв Западного Забайкалья

Горизонт	Глубина, см	Фракций (мм), %		pH _{водн}	Обменные катионы, смоль(экв)/кг		Сумма солей	CO ₂ карбо- натов	Гумус	N _{общ}	Подвижные, мг/100 г по Мачигину			Тип засоления
		<0.01	<0.001		EKO	Na ⁺					N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Разрез 13. Солончак типичный (Заиграевский район, с. Первомаевка, высокий берег р. Уды)														
S[AJ]	0-30	46.7	29.1	9.2	23.0	4.4	1.93	11.3	3.1	0.16	4.10	3.5	41.5	Хлоридно-суль- фатно-содовый
S[AJ]BCsa	30-42	19.7	5.1	9.8	17.0	3.9	0.81	7.8	0.8	0.04	1.14	1.1	20.7	
BCsa,s	42-50	36.1	18.7	9.7	18.2	5.1	0.48	3.6	0.6	0.03	0.60	0.4	38.1	
BCs	50-80	40.7	15.2	9.6	17.1	3.2	0.31	0.6	0.4	0.03	0.07	0.4	15.7	
Cs	80-100	26.6	5.1	8.7	16.5	3.0	0.35	0.3	0.3	0.01	0.06	0.2	8.1	
Разрез 14. Солончак соровой (Заиграевский район, берег оз. Гуджирное)														
I слой	0-22	15.5	3.7	9.0	10.0	5.2	2.45	7.7	0.3	0.02	-	3.7	31.1	Содово-хлоридно- сульфатный
II слой	22-53	12.4	3.1	8.7	3.0	0.4	0.17	0.2	0.1	0.007	-	1.2	5.3	
Разрез 5 (P.2-2022). Солончак квазилгеевый (Иволгинский район, с. Оронгой, правый борг оз. Белое)														
AJ1	0-10	17.0	2.9	7.9	13.7	6.7	1.64	16.5	3.8	0.17	0.12	0.7	4.6	Сульфатный
AJ2	10-18 (21)	17.2	2.4	7.9	11.0	5.6	1.27	18.0	2.4	0.12	0.12	0.4	3.4	
Bg	18(21)-34(41)	26.3	11.0	8.1	8.8	2.2	0.38	27.5	1.6	0.10	0.20	0.5	5.6	
Q	34(41)-55	30.1	10.8	8.2	10.4	1.4	0.21	41.5	1.1	0.10	0.12	0.6	4.3	
Разрез 3. Аллювиальная светлогумусовая засоленная (Иволгинский район, с. Хубисхал)														
AJ	0-30(43)	18.4	4.9	8.0	11.2	1.6	0.34	1.2	1.5	-	0.16	6.0	26.3	Сульфатный
Bca	30(43)-50	30.1	10.8	8.2	13.0	6.5	0.64	7.8	0.6	-	0.12	1.0	16.0	
Разрез 4. Аллювиальная светлогумусовая засоленная (Иволгинский район, с. Хубисхал)														
AJ1	0-6	15.7	2.8	8.0	12.3	0.4	0.17	2.2	2.0	0.17	0.16	2.9	49.2	Сульфатный
AJ2	6-21(26)	21.0	2.8	8.3	10.6	5.2	0.35	1.5	1.2	0.09	0.16	0.4	8.4	
Bsp,ca	21(26)-50	28.6	10.0	8.0	9.9	8.6	0.85	6.8	0.9	0.05	0.16	0.7	4.4	
Разрез 1-2022. Солончак типичный (Иволгинский район, с. Оронгой, Итгыловский источник)														
AUca	0-43(46)	27.8	14.19	8.4	15.9	6.1	0.60	13.0	4.4	0.10	1.7	0.8	28.6	Сульфатно-хло- ридно-содовый
B	43(46)-50	14.8	10.5	8.5	16.2	3.3	0.33	6.8	1.5	0.03	0.12	0.7	10.0	
Разрез 11. Солончак глеевый (Джидинский район, с. Белоозерск, берег оз. Каменный ключ)														
S	0-2	27.7	4.8	8.9	38.0	10.4	1.58	2.8	3.2	0.18	2.15	1.5	65.3	Хлоридно-суль- фатно-содовый
S[AJ]	2-9	24.3	3.2	8.7	18.0	8.3	1.23	2.0	2.4	0.13	1.72	1.2	27.7	
Bca,s	9-23	20.5	3.9	8.7	33.0	2.2	0.31	3.8	0.5	0.04	0.68	1.2	12.1	
Bca,s	23-43	26.9	4.2	8.9	19.0	4.8	0.54	1.7	1.4	0.06	0.852	1.1	20.7	
Gs,ca	43-60	27.7	3.9	8.6	-	-	0.24	5.5	0.8	0.08	0.09	0.7	17.4	
CGs,ca	60-80	35.3	4.2	8.7	-	-	0.23	4.6	1.0	0.06	0.10	0.5	17.4	
Разрез 12. Солончак темный (Селенгинский район, пойма р. Баян-Гол)														
S[Ao]	0-6	27.1	3.4	8.0	20.0	4.8	1.07	1.9	5.4	0.27	3.10	3.5	51.3	Сульфатный
S[AU]	6-20	18.2	4.2	8.2	19.0	3.5	0.88	3.0	3.9	0.20	2.60	2.4	20.7	
[AU]Bca,s,g	20-30	16.4	4.3	8.4	12.0	1.7	0.43	2.9	1.1	0.06	0.25	1.6	7.2	
BCsa,s,g	30-58	14.7	3.7	8.7	11.5	1.5	0.18	2.2	1.0	0.07	0.21	0.8	13.1	
Cg	58-100	19.9	4.0	8.5	10.1	1.1	0.13	0.5	0.8	0.04	0.07	0.4	10.6	

Примечание. Прочерк – нет данных.

Для установления механизма поглощения проведено сравнительное исследование сорбции фосфат-иона почвой из раствора $\text{K}_2\text{H}_2\text{PO}_4$ в статических условиях. Использован водный раствор $\text{K}_2\text{H}_2\text{PO}_4$ в концентрациях 0,25, 0,5, 1,0, 3,0, 5,0 мМ Р/л в соотношении почва : раствор 1 : 10 (3 г навески воздушно-сухой почвы, просеянной через сито d 1 мм, заливали 30 мл раствора $\text{K}_2\text{H}_2\text{PO}_4$) при температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$. Время взаимодействия 24 ч. Суспензии фильтровали с использованием фильтровальной бумаги “синяя лента”. Определение концентрации фосфат-иона в фильтрате производили колориметрическим методом по Труога–Мейера [2].

Количество сорбированного фосфора было вычислено по разности его содержания в исходных растворах (начальная концентрация) и в фильтратах почвенных суспензий (конечная концентрация).

По результатам эксперимента построены изотермы адсорбции по 5 точкам и рассчитаны параметры сорбции по уравнениям Ленгмюра и Фрейндлиха. Изотерма адсорбции Ленгмюра является наиболее известной среди всех изотерм, описывающих сорбционное равновесие:

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

Для расчета параметров сорбции (A_{\max} , K_L) уравнение линеаризовано:

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

где A – количество адсорбированного вещества на единицу массы сорбента, мМ/кг, $C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация раствора, мМ/л, A_{\max} – максимальная емкость адсорбций, мМ/кг, K_L – константа адсорбции, связанная с энергией связи сорбции, л/мМ.

Уравнение Фрейндлиха представляет собой эмпирическую зависимость между количеством вещества, адсорбированного на твердой поверхности, и его равновесной концентрацией. Данная модель описывает поглощение ионов на гетерогенной поверхности и подразумевает, что сродство к адсорбции экспоненциально уменьшается с увеличением насыщения поверхности, что ближе к реальности, чем предположение о постоянной энергии связи, присущей уравнению Ленгмюра.

Изотерма адсорбции Фрейндлиха математически выражается как

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

Уравнение Фрейндлиха в линейной форме позволяет рассчитать параметры сорбции:

$$\lg A = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_{\text{равн}} \quad (4)$$

где A – количество поглощенного Р, мМ/кг, $C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация, мМ/л, K_F – коэффициент емкости Р (мМ/кг) и $1/n$ – константа, связанная с энергией связи.

Линейный график и уравнение регрессии для каждой почвы были получены путем сопоставления $\lg C_{\text{равн}}$ с $\lg A$. Наклон и пересечение были приняты равными $1/n$ и K_F соответственно. Физический смысл K_F в том, что он равен величине адсорбции при равновесной концентрации, равной единице (если $C_{\text{равн}} = 1$ моль/л, то $K_F = A$).

Характеристику межфазного распределения ионов выражают через коэффициент распределения, который устанавливает соотношение между равновесными концентрациями частиц в сорбенте и в растворе [53]:

$$K_d = C_{\text{тв}}/C_{\text{равн}} \quad (5)$$

где K_d – коэффициент распределения, л/кг; $C_{\text{тв}}$ – равновесная концентрация ионов в сорбенте (твердой фазе), мМ/кг; $C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация ионов в растворе, мМ/л.

МБЕ_Р представляет собой произведение A_{\max} и K_L , а SPR – количество Р, которое должно быть сорбировано почвой для поддержания концентрации Р = 0,2 мг/кг (0,0065 мМ/л) в почвенном растворе, которое удовлетворит потребность в фосфоре для многих культур [40]. SPR были определены путем подстановки желаемого соотношения содержания Р в уравнения Ленгмюра (1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание и формы фосфора в почвах в значительной степени определяется почвообразовательными процессами. Так, фосфор имеет тенденцию удерживаться почвами как при щелочном, так и при кислом рН. При щелочных значениях рН фосфор связывается CaCO_3 , а при кислых значениях рН – оксидами железа, алюминия, марганца.

Почвы засушливых регионов содержат гораздо меньше доступного фосфора по сравнению с влажными из-за его низкого общего содержания и высокой фиксации в почвах, обусловленной снижением выщелачивания и аккумуляцией солей кальция. Большая часть водорастворимого фосфора, вносимого с удобрениями в почву, быстро превращается в другие менее подвижные формы.

Однако во влажных почвах большая часть фосфора находится в органических соединениях или связана с вторичными оксидами алюминия и железа, что может снизить его доступность для растений и микробов [45].

Авторы [30] подчеркивают, что гидроморфный солончак характеризуется высоким валовым

содержанием фосфора: в горизонтах Ad и A₁ 0.26 и 0.16% соответственно. С глубиной его количество увеличивается до 0.46%. Запасы валового фосфора в гидроморфном солончаке, как и во всех остальных почвах Иволгинской котловины, значительны: в слое 0–20 см они составляют 4.7 т/га, в слое 0–50 см – 13.3 т/га.

Для луговых засоленных почв и солончаков Алтая, по данным [12], характерны очень низкое накопление подвижных фосфатов – около 2 мг/100 г почвы и избыток обменного калия, что обусловлено гидрослюдистым минералогическим составом илистой фракции почвообразующих пород.

Основными почвенными факторами, влияющими на сорбцию фосфора, являются время, pH, содержание органического вещества, глины, аморфных оксидов железа, алюминия, марганца, а также CaCO₃ [37]. На адсорбцию фосфатов pH почвы в основном влияет в диапазоне значений 4–8. Органические вещества на адсорбцию фосфора влияют двумя способами: косвенно, ингибируя кристаллизацию оксида железа, и напрямую, конкурируя за центры адсорбции. В работе [54] показано, что серия щелочных почв, собранных из района Дера (Пакистан), с содержанием глины 52, 48, 21 и 20% адсорбировала разное количество фосфора. Почва с самым высоким содержанием глины адсорбировала наибольшее количество фосфата (25.73 ммоль/кг), а наименьшее количество – почва с низким содержанием глины (6.00 ммоль/кг). При этом максимальная сорбция происходила в первые два дня, после чего наблюдалось незначительное поглощение.

Высокая ионная сила, обусловленная концентрацией электролита в засоленной почве, может привести к усиленной адсорбции P и низкой растворимости [49]. В щелочных почвах с высокой концентрацией электролитов (например, Na и Ca) адсорбция P увеличивается за счет осаждения Na–P и Ca–P [38, 46].

Результаты исследования [43] показали, что кислые почвы с высоким содержанием глины, оксидов и гидроксидов Al и Fe обладают высокой сорбционной способностью по отношению к фосфору.

Изотерма сорбции фосфора является важнейшей сорбционной характеристикой почвы, так как не только выражает зависимость $A = f(C_{\text{равн}})$, но и отражает условия течения сорбционного процесса [34]. Выпуклая изотерма указывает, что сорбционный процесс протекает в наиболее благоприятных условиях, например, большая энергия связи, взаимодействия фосфора с почвой или отсутствие других конкурирующих за сорбционные места компонентов. Линейные изотермы наблюдаются, как правило, при относительно малых концентрациях растворов фосфора, а также в случаях, когда в сорбционном процессе участвуют

другие одинаковые по конкурирующей способности или по сорбционной связи компоненты. Вогнутая изотерма соответствует случаю, когда сорбция фосфатов происходит в неблагоприятных условиях, например, при малой энергии взаимодействия фосфата с почвой или при участии в сорбционном процессе других веществ, сорбирующихся сильнее, чем фосфаты [34].

Изучение межфазного распределения фосфат-ионов показало, что полученные экспериментальные изотермы имеют различный характер по классификации Брунауэра: выпуклый и слабывыпуклый (I тип), сигмовидный (II тип) и вогнутый (III тип) и относятся в основном к L-типу изотерм (рис. 2).

I тип изотермы свидетельствует, что при низких концентрациях фосфат-ионы имеют относительно высокое химическое сродство с поверхностью адсорбента. По мере заполнения сорбционных центров уменьшается количество незаполненных сорбционных позиций и соответственно – снижается количество адсорбированного вещества. Такой тип изотермы характерен как при хемосорбции, так и при физической адсорбции и предполагает относительную однородность сорбционных центров по отношению к сорбату. Данный тип изотермы характерен для большинства образцов почв.

Изотерма II типа характеризуется малым наклоном кривой в области малых концентраций, по мере возрастания равновесной концентрации наклон увеличивается. На рис. 2 такую форму изотермы адсорбции фосфат-ионов наблюдали в следующих образцах почв: разрез 1–2022 (43–50 см), разрез 4 (6–21 (26) см), разрез 5 ((P.2–2022)) (10–18 см), разрез 11 (0–2, 2–9, 23–43 см), разрез 12 (0–6, 30–58, 58–100 см), разрез 13 (42–50, 50–80 см). При малых концентрациях основная часть фосфат-ионов остается в растворе, так как сродство с катионами раствора фосфат-ионов выше, чем с поверхностью почвенных частиц. Поэтому количество адсорбированных почвой фосфат-ионов относительно невелико. При увеличении равновесной концентрации фосфат-ионов в растворе они начинают интенсивно адсорбироваться на поверхности твердой фазы системы, при этом кривая приобретает больший наклон, что можно объяснить окончанием образования мономолекулярного слоя сорбата и началом процесса многослойной адсорбции.

Изотерма III типа интерпретируется многослойностью и физической адсорбцией. Характерна для адсорбции веществ со слабым взаимодействием адсорбат–адсорбент. На начальном участке изотермы из-за слабого взаимодействия адсорбат–адсорбент наблюдается незначительная адсорбция. По мере заполнения поверхности адсорбированными молекулами адсорбция возрастает.

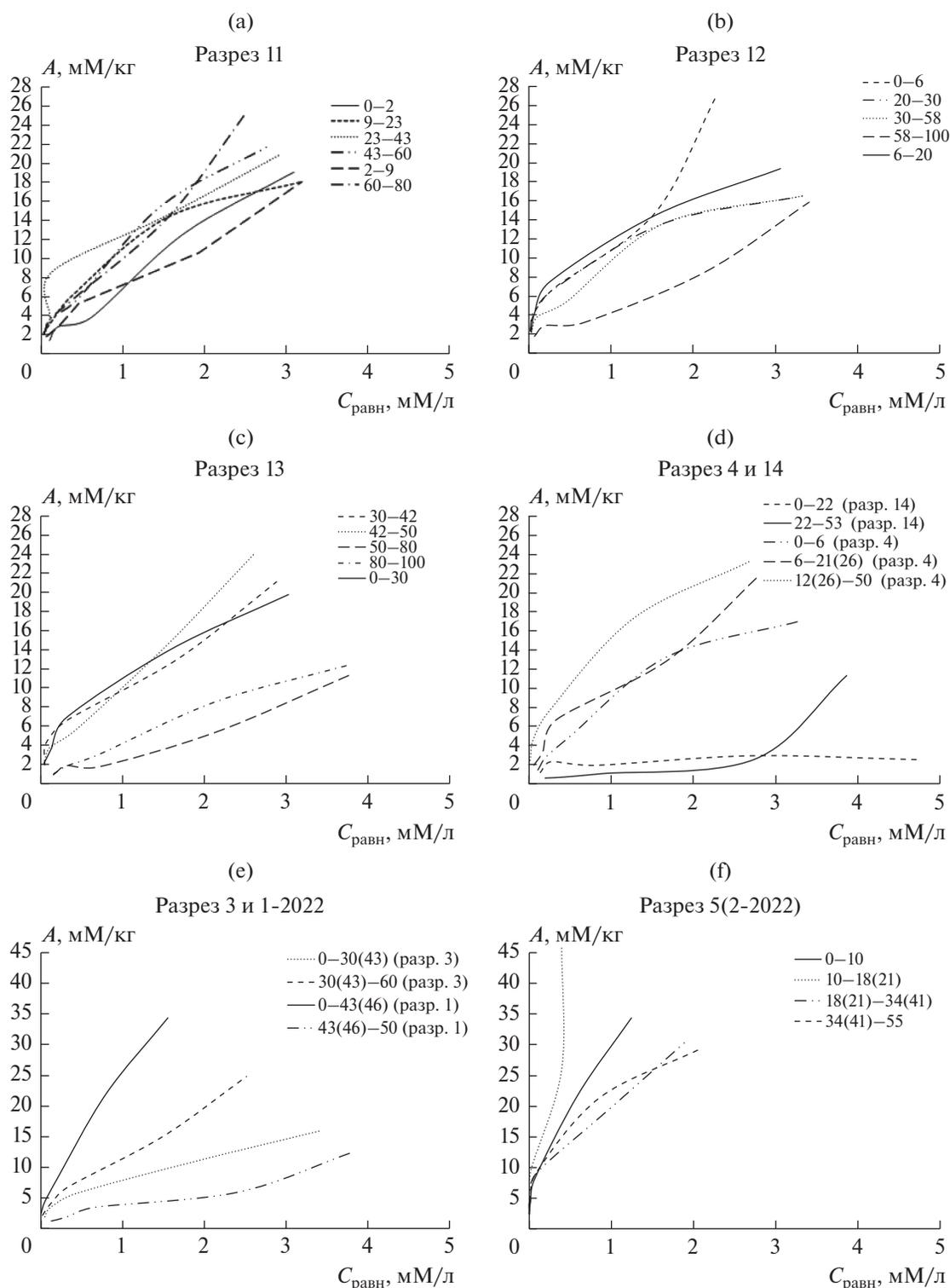


Рис. 2. Изотермы сорбции фосфора почвой: а – разрез 11 – солончак глеевый хлоридно-сульфатно-содовый, б – разрез 12 – солончак темный сульфатный, с – разрез 13 – солончак типичный хлоридно-сульфатно-содовый, d – разрез 14 – солончак сорový содово-хлоридно-сульфатный, разрез 4 – аллювиальная светлогумусовая засоленная, e – разрез 3 – аллювиальная светлогумусовая засоленная, разрез 1 – солончак типичный сульфатно-хлоридно-содовый, f – разрез 5 (P.2-2022) – солончак квазиглеевый сульфатный.

тает, так как молекулы адсорбата взаимодействуют друг с другом значительно сильнее, чем с поверхностью адсорбента. Такой тип изотерм выявлен для слоя 22–53 см солончака сорового (разрез 14), с невысоким содержанием физической глины, растворимых солей, карбонатов, низким ЕКО.

Можно выделить следующие основные механизмы поглощения фосфат-ионов исследуемыми почвами:

1) образование малорастворимых фосфатов при взаимодействии с солями почвенного раствора, в частности, с катионами кальция, магния (химическое поглощение, которое характерно для всех горизонтов);

2) минералами-солями: гипс, кальцит, доломит (в горизонтах, в которых присутствуют данные минералы);

3) глинистыми минералами (физико-химическое, в горизонтах с относительно высоким содержанием фракции глины);

4) аморфным кремнеземом путем механического захвата (оклюдирование, в основном в верхних горизонтах солончаков);

5) органическим веществом [22] с образованием органо-минеральных комплексов. Коллоиды гумуса поглощают фосфат-ионы химически и физически. При этом поглощение фосфат-ионов гумусом значительно ниже, чем R_2O_3 и щелочно-земельными основаниями, в связи с чем увеличение гумуса в почве уменьшает поглотительную способность почв [13]. Данный механизм сорбции фосфат-ионов в основном отмечается для гумусовых горизонтов.

Ступенчатый характер изотерм указывает на участие в процессах поглощения фосфат-ионов не менее двух различных механизмов и (или) на наличие неоднородных функциональных групп, образующих различные по прочности связи соединения с изученными ионами [47].

Предполагается, что при рН от 4.5 до 7.5 фосфор фиксируется на поверхности глинистых минералов, а при рН от 6 до 10 осаждается двухвалентными катионами [52].

В щелочных и известковых почвах Са образует с фосфат-ионами ряд соединений (от монокальций фосфата до гидроксиапатита), при этом гидроксиапатит является единственным стабильным соединением фосфора в переходный период [50].

“При повышении концентрации фосфат-ионов в растворе за счет удобрений в почве начинают преобладать процессы физической адсорбции. Благодаря этому подвижность внесенных фосфатов значительно выше, чем природных. Ионы фосфорной кислоты вступают в реакции обмена с солями органических кислот: фульво- и гуминовыми, лимонной, янтарной, молочной и др. Такими обменно-адсорбированными формами

может быть представлено от 50 до 90% фосфатов. При внесении растворимых фосфатов в почву в виде $CaHPO_4$, $Ca(H_2PO_4)_2$, $(NH_4)_2HPO_4$, $NH_4H_2PO_4$ в результате химического связывания с гидратированными ионами Al, Fe, Mn, Si, Ca, Mg они превращаются в труднодоступные растениями формы в виде органо-минеральных комплексов” [23, стр. 44].

Сорбционные характеристики выбранных почв были удовлетворительно описаны модифицированными уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха. Вариабельность значений рассчитанных параметров сорбции фосфора (табл. 2) обусловлена различием свойств исследуемых почв. Видно, что уравнение Фрейндлиха ($R^2 = 0.6000–0.9967$) показало лучшее описание явлений адсорбции, чем уравнение Ленгмюра ($R^2 = 0.2040–0.9870$). Полученные данные показывают, что относительно высокими сорбционными свойствами по отношению к фосфат-ионам обладают солончаки типичные (разрезы 1-2022, 4, 13) и квазиглеевый (разрез 5 (P.2-2022)). Так, значение A_{max} в гумусовых горизонтах этих почв изменялось в пределах 23.04–42.74 мМ Р/кг, в нижележащих горизонтах – 16.26–30.39 мМ Р/кг. Самое низкое значение A_{max} выявлено у солончака сорового (разрез 14). Все почвы, за исключением солончака сорового, имели максимумы сорбции фосфора в пределах 17.70–42.74 мМ Р/кг, что указывает на различие механизмов сорбции фосфат-ионов, связанных со свойствами почв. Так, относительно большое различие в сорбции фосфат-ионов солончаком квазиглеевым (разрез 5 (P.2-2022)) от других подтипов солончаков обусловлено относительно повышенным содержанием карбонатов и гумуса, суммой солей, а солончака сорового (разрез 14) – рН, очень низким содержанием гумуса, меньшим содержанием физической глины, типом засоления и высокой суммой солей.

Различие в свойствах почв обуславливает также особенности внутрипрофильного поглощения ионами фосфат-ионов. Так, относительно повышенное содержание физической глины, ЕКО, карбонатов и гумуса в гумусовых горизонтах разрезов 1, 5 (P.2-2022), 12 и 13 обуславливают максимальную сорбцию и большее сродство фосфат-ионов в них, чем в нижележащих горизонтах. Равномерное поглощение фосфат-ионов в солончаке глеевом (разрез 11) связано с относительно равномерным распределением физической глины, карбонатов и рН. Повышение поглощения фосфат-ионов в нижнем горизонте солончака типичного (разрез 4) обусловлено увеличением содержания физической глины (илистой фракции) и карбонатов вниз по профилю.

В зависимости от типа поглощения и состояния адсорбента поглощенные фосфат-ионы имеют различную энергию связи с почвенной мицел-

Таблица 2. Параметры сорбции фосфат-ионов засоленными почвами Западного Забайкалья

Место отбора	Почва	Горизонт, глубина, см	K_d , л/кг	Параметры уравнения Ленгмюра					Параметры уравнения Фрейндлиха			
				A_{\max} , ммоль/кг	K_L , л/ммоль	R^2	МБЕР, л/кг	SPR, ммоль/кг	K_F , ммоль/кг	$1/n$	R^2	
Разрез 13, Заиграевский район, правый берег р. Ула	Солончак типичный хлоридно-сульфатно-содовый	S[AJ], 0–30	21.58	23.04	1.4500	0.9706	33.41	0.2137	11.15	0.5402	0.9437	
		S[AJ]Bca, 30–42	19.91	23.36	1.4658	0.8983	34.24	0.2190	11.41	0.5086	0.9333	
		BCsa.s, 42–50	12.91	30.67	0.8624	0.7591	26.45	0.1698	11.79	0.5685	0.9720	
		BCs, 50–80	1.95	23.80	0.1575	0.2040	3.75	0.0242	3.14	0.7176	0.8887	
		CS, 80–100	4.21	28.49	0.1981	0.8650	5.64	0.0364	4.31	0.8094	0.9967	
Разрез 14, Заиграевский район, оз. Гуджирное	Солончак соровой содово-хлоридно-сульфатный	I слой, 0–22	2.35	2.64	8.8700	0.9870	23.42	0.1430	2.13	0.1838	0.6000	
		II слой, 22–53	1.19	4.02	0.5584	0.7881	2.24	0.0144	1.74	0.8689	0.8192	
Разрез 1-2022, Иволгинский район, Итигловский источник	Солончак типичный сульфатно-хлоридно-содовый	AUca, 0–43(46)	39.55	42.74	1.8720	0.8353	79.99	0.5104	23.37	0.5254	0.9690	
		B, 43(46)–50	5.22	16.26	0.4158	0.6520	6.76	0.0436	4.24	0.6462	0.9668	
Разрез 5 (Р.2-2022), Иволгинский район, правый борт оз. Белое	Солончак квазиглеевый сульфатный	AJ1, 0–10	145.04	39.22	6.0714	0.9369	238.12	1.4795	32.32	0.4615	0.9974	
		AJ2, 10–18(21)	394.89	42.02	14.0000	0.8507	588.28	3.4836	63.43	0.5496	0.9607	
		Bq, 18(21)–34(41)	96.60	30.39	5.8750	0.9362	178.54	1.1107	22.26	0.3863	0.9764	
		Q, 34(41)–55	111.08	30.49	5.9636	0.9811	181.83	1.1305	22.68	0.4144	0.9467	
Разрез 3, Иволгинский район, с. Хубисхал	Аллювиальная светлогумусовая засоленная	AJ, 0–30(43)	13.29	18.12	1.3431	0.9516	24.34	1.5579	8.45	0.5009	0.9965	
		Bca, 30(43)–60	20.44	28.33	1.3629	0.8485	38.77	0.2471	13.16	0.4995	0.9787	
		AJ1, 0–6	9.87	27.85	0.4918	0.9805	13.69	0.0882	8.05	0.7334	0.9883	
Разрез 4, Иволгинский район, с. Хубисхал	Аллювиальная светлогумусовая засоленная	AJ2, 6–21(26)	20.62	26.59	0.9715	0.8706	25.83	0.1658	10.97	0.5951	0.9827	
		Bsp.ca, 21(26)–50	31.39	24.81	3.1732	0.9644	27.98	0.4981	15.17	0.3994	0.9943	
		S[Ao], 0–6	21.93	27.70	1.6869	0.7776	46.73	0.2985	14.29	0.4825	0.9669	
		S[AU], 6–20	29.46	20.88	2.5890	0.9807	54.06	0.3433	6.52	0.1967	0.8220	
Разрез 12, Селенгинский район, пойма р. Баян Гол	Солончак темный сульфатный	[AU], 20–30	21.23	17.51	3.4191	0.9846	59.87	0.3782	10.93	0.3689	0.9928	
		BCsa.g, 30–58	11.86	18.94	1.7311	0.9416	32.79	0.2094	9.69	0.4280	0.9714	
		Cg, 58–100	4.80	20.20	0.5351	0.5597	10.80	0.0696	6.18	0.5199	0.8982	
Разрез 11, Джилинский район, оз. Каменный ключ	Солончак глеевый хлоридно-сульфатно-содовый	S, 0–2	6.33	37.04	0.3044	0.5442	11.28	0.0723	7.75	0.7297	0.9656	
		S[AJ], 2–9	11.53	22.32	0.7711	0.84355	17.21	0.1106	5.34	0.4851	0.8383	
		BCsa.s, 9–23	15.83	21.19	1.5375	0.9663	32.58	0.2083	9.13	1.3600	0.7878	
		Bca.s, 23–43	63.41	22.32	2.3333	0.9575	52.08	0.3313	12.96	0.4691	0.8931	
		Gs, ca, 43–60	12.91	27.93	1.0142	0.8539	28.33	0.1817	11.57	0.5448	0.9761	
CGs, ca, 60–80	14.29	30.96	0.8972	0.7458	27.78	0.1783	12.16	0.5673	0.9730			

Примечание. МБЕР – максимальная буферная емкость почв по отношению к P, SPR – стандартная потребность в фосфоре.

лой: при химическом поглощении прочность их связи более высокая, чем при поверхностной адсорбции. При этом наименьшую энергию связи имеют ионы, расположенные на поверхности, у края грани, внешней части ребер и углов частиц твердой фазы почвы или вещества. Ионы, расположенные внутри частиц, на внутренних углах и ребрах, удерживаются более прочно. В аморфных веществах правильное геометрическое расположение поверхностных ионов, четкое выделение ребер и углов менее выражены, чем в кристаллах. Но тем не менее и в них имеет место энергетическая неравноценность иона в зависимости от его расположения в разных местах частиц [24].

K_L исследованных почв находилась в пределах 0.3–14.0 л/мМ. Солончак темный (разрез 12) и солончак квазиглеевый (разрез 5 (Р.2-2022)) наиболее прочно связывают фосфат-ионы, что, видимо, связано с преобладанием процесса хемосорбции фосфат-ионов органическим веществом и карбонатами. Высокое значение K_L в слое 0–22 см солончака сорового (разрез 14), возможно, связано с уровнем содержания карбонатов в нем и образованием малорастворимых фосфатов кальция. Повышение энергии связи фосфат-ионов в нижнем горизонте солончака типичного (разрез 4) обусловлено увеличением содержания физической глины (илистой фракции) и карбонатов вниз по профилю.

По утверждению [35], чем больше величина A_{max} и меньше константа K_L , тем лучшим сорбентом является вещество и чем выше значение K_L , тем выше сродство ионов фосфора к почве. Полученные данные частично не согласуются с этим утверждением. В данном случае максимальная буферная емкость фосфора наблюдалась в почвах с максимальными значениями A_{max} и K_L .

В соответствии с уравнением Фрейндлиха (3), чем больше K_F , тем интенсивнее протекает процесс адсорбции. Так, значения K_F в изученных почвах изменялось в гумусовом горизонте от 5.34 до 63.43 мМ Р/кг, в минеральных от 1.74 до 22.68 мМ Р/кг.

Значения коэффициента распределения (K_d) варьировали в пределах 1.95–145.04 л/кг. Высокие значения K_d выявлены для солончака квазиглеевого (разрез 5 (Р.2-2022)) и самые низкие – для солончака сорового (разрез 14). Корреляция между K_d и A_{max} оценивается как средняя ($r = 0.51$), K_d и K_L – высокая ($r = 0.84$, достоверно при $p \leq 0.05$). Чем выше K_d , тем интенсивнее процесс переноса сорбата из раствора в твердую фазу, поэтому его называют мерой специфичности.

Полученные результаты исследований имеют некоторые отличия от данных, приводимых другими авторами для различных типов почв. Так, в работах [3, 36, 51] приводят данные по сорбции фосфат-ионов исследуемыми ими почвами, ко-

торые ниже наших значений. В работе [3] отмечено, что пахотные горизонты несмытых агродерново-подзолистых почв характеризуются высокими уровнем подвижности фосфора и низкой сорбционной способностью по отношению к фосфат-иону ($P_{сorb} 96.06 \pm 0.53$ мг/кг почвы или 3.10 мМ/кг), что ниже полученных в исследовании. По данным [55], в поверхностных слоях суглинистых почв (Онтарио, Канада) значение A_{max} изменялось в пределах 86–376 мг/кг или 2.78–12.14 мМ/кг. В слабокислых и нейтральных почвах южной и центральной Швеции, по данным [40], сорбционная способность по отношению к Р варьировала от 6.0 до 12.2 мМ/кг (в Udic Haplobого с pH 8.0 сорбировалось фосфора 6.6 мМ/кг) и коррелировала с количеством экстрагируемых оксалатом Fe и Al в почвах.

Близкие к полученным в исследовании данным, можно считать значения A_{max} и K_L для некоторых кислых и слабокислых почв южной Эфиопии, полученных в работе [56], которые находились в пределах 560–833 мг Р/кг (18.08–26.93 мМ Р/кг) и 0.16–20 л/кг соответственно. Коэффициент емкости по Фрейндлиху (K_F) в этих почвах колебался от 237 до 1200 мг Р/кг (от 7.65 до 38.74 мМ Р/кг). Для 16 репрезентативных почв с кислой реакцией среды на Окинаве (Япония) максимумы сорбции Р варьировали в зависимости от почвы, со значениями 630–2208 мг Р/кг (20.34–71.29 мМ Р/кг) при среднем значении 1362 мг Р/кг (43.97 мМ Р/кг). Эти почвы можно рассматривать как обладающие высокой сорбционной способностью [44].

Несколько выше сорбция фосфат-ионов в почвах, описанных в работах [8, 48], чем в исследуемых в настоящей статье. Так, по данным [8], в дерново-подзолистой почве северо-западной части России и тропических ферралитных почвах Гвинеи сорбируется Р от 33.78 до 70.38 мМ/кг или от 34 до 70% внесенного фосфора. Сорбция фосфора слабокислыми вулканическими почвами экваториальной Африки [48] составляет 47.7 мМ Р/кг в silandic Andosol и 41.6 мМ Р/кг в vitric Andosol. Процентное значение сорбированного фосфора в этих почвах варьировало от 77.0 до 98.1 в silandic Andosol (Руанда) и от 65.6 до 95.9 в vitric Andosol (Сан-Томе).

Максимальная буферная емкость фосфора (МБЕ_р) выявлена в солончаке квазиглеевом (разрез 5 (Р.2-2022)) и типичном (разрез 1-2022), а минимальная – в солончаке соровом (разрез 14).

Различие в буферной емкости почв по отношению к ионам фосфора связаны со свойствами почв и механизмами закрепления его почвой.

Параметры адсорбции положительно коррелировали с содержанием гумуса, карбонатов, суммой солей, отрицательно – с pH, и в зависимости от подтипа почв – различно с содержанием физической глины (табл. 3). Для солончаков гле-

Таблица 3. Коэффициенты парной корреляции (r) параметров сорбции фосфат-ионов со свойствами почв

Почва	Параметры сорбции	pH	Гумус	Сумма солей	Физическая глина	Карбонаты
Солончаки глеевые	A_{\max}	-0.63	0.64	0.57	-0.30	0.32
	K_L	-0.85	0.25	0.23	-0.55	0.58
	K_F	-0.82	0.32	0.31	-0.57	0.45
Солончаки типичные	A_{\max}	-0.25	0.51	-0.10	0.14	0.42
	K_L	-0.02	0.76	0.57	0.06	0.76
	K_F	-0.19	0.79	0.28	0.04	0.61
Солончак темный	A_{\max}	-0.79	0.87	0.75	0.95	-0.20
	K_L	-0.19	0.09	0.31	-0.33	0.93
	K_F	-0.44	0.47	0.47	0.52	0.21
Аллювиальная светлогумусовая засоленная	A_{\max}	0.17	0.72	0.32	0.58	0.43
	K_L	-0.34	0.01	0.90	0.76	0.60
	K_F	0.09	0.61	0.66	0.80	0.85

Примечание. Для солончака сорового расчет корреляции не проводили.

евых корреляция параметров сорбции фосфат-ионов оценивалась как отрицательная с pH (средняя и высокая), содержанием физической глины (слабая и средняя), положительная с содержанием гумуса (слабая, средняя), суммой солей (слабая и средняя), с карбонатами (слабая и средняя). На A_{\max} фосфат-ионов умеренное влияние в этих почвах оказывало pH, содержание гумуса и солей. Прочность связи (K_L) фосфат-ионов с твердой фазой этих почв и K_F определялись в основном реакцией среды, содержанием карбонатов и физической глины. Солончаки типичные характеризовались наличием очень слабой и слабой корреляции параметров сорбции фосфат-ионов с такими показателями свойств почв, как pH и содержание физической глины. Содержание гумуса и карбонатов в данных почвах оказывают умеренное и сильное влияние на параметры сорбции. В солончаке темном была обнаружена высокая положительная корреляция между значениями A_{\max} и свойствами почвы (содержание гумуса, физической глины, сумма солей), высокая отрицательная – с pH и очень слабая отрицательная – с уровнем содержания карбонатов. Параметры K_L и K_F в этой почве имели слабую корреляцию с его свойствами.

Таким образом, установить четкую корреляционную зависимость между параметрами сорбции и некоторыми свойствами почв не представилось возможным. Поэтому можно предположить, что совокупность свойств рассмотренных почв определяет особенности поглощения ими фосфат-ионов.

Величина степени фиксации фосфора исследуемых почв зависит от их свойств и, возможно, обуславливает различную потребность в фосфорных удобрениях.

Концентрация фосфат-ионов в почвенном растворе, равная 0.2 мг/л (0.006457 мМ/л), представляет собой количество фосфора, которое должно быть доступно в почве для оптимального роста многих растений. Эта концентрация фосфора известна как SPR – стандартная концентрация P в почвенном растворе [40].

Согласно [51], почвы, которые поглощают P менее 150 мг/кг почвы (4.84 мМ/кг) при его равновесной концентрации в почвенном растворе 0.2 мг/л, считаются слабосорбирующими, а те, которые поглощают больше этого значения – высорбирующими. Авторы подчеркивают, что почвы могут иметь высокие сорбционные центры и низкую энергию сорбции, чтобы удерживать фосфор на поверхности. В исследованных почвах значения SPR колебалось от 0.0723 до 3.4836 мМ P/кг, что позволяет отнести их к низко сорбирующим по отношению к фосфору.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование в статических условиях адсорбции фосфора засоленными почвами Западного Забайкалья показало, что модели адсорбции Ленгмюра и Фрейндлиха могут быть использованы для удовлетворительного описания процесса сорбции. При этом уравнение Фрейндлиха лучше описывает адсорбцию фосфора данными почвами, чем уравнение Ленгмюра. Среди изученных почв относительная высокая сорбция P наблюда-

лась у солончаков квазиглеевого и типичного. Значение A_{\max} в гумусовых горизонтах этих почв изменялось в пределах 23.04–42.74 мМ Р/кг, в нижележащих горизонтах – 16.26–30.39 мМ Р/кг. Самые низкие значения A_{\max} выявлены для солончака сорового (2.64–4.02 мМ Р/кг).

В целом все почвы, за исключением солончака сорового, имели значение A_{\max} в пределах 17.70–42.74 мМ Р/кг, что свидетельствует о различии сорбционных свойств почв.

K_d находилась в пределах 0.3–14.0 л/мМ. Солончак темный (разрез 12) и солончак квазиглеевый разрез 5 (Р.2-2022) наиболее прочно связывают фосфор. Значение K_f в изученных почвах изменялось в гумусовом горизонте от 5.34 до 63.43 ммоль Р/кг, в минеральных – от 1.74 до 22.68 мМ Р/кг.

K_d колебался в пределах 1.95–145.04 л/кг с высокими значениями для солончака квазиглеевого (разрез 5 (Р.2-2022)) и низкими для солончака сорового. Корреляция между K_d и A_{\max} оценивается как средняя ($r = 0.51$), K_d и K_L – высокая ($r = 0.84$, при $p \leq 0.05$), что может свидетельствовать о том, что на межфазовое распределение фосфат-ионов большое влияние оказывает их сродство к сорбционной поверхности.

Исследованные почвы по значениям SPR (0.0723 до 3.4836 мМ Р/кг) относятся к низко сорбирующим фосфор.

По способности сорбировать фосфор изученные почвы образуют следующий убывающий ряд: солончак квазиглеевый > солончак типичный > > солончак темный > солончак глеевый > аллювиальная светлогумусовая засоленная > солончак соровый.

Результаты исследования показали, что различия в свойствах почв (содержание физической глины, гумуса, карбонатов, состав солей и тип химизма засоления, рН, ЕКО) и механизмах закрепления фосфора (химическое, физико-химическое) изученными почвами определяют их сорбционную емкость по отношению к фосфору.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания № 0271-2021-0004.FWSM-2021-0004.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абашеева Н.Е.* Агрехимия почв Новосибирск: Наука: Сиб. изд. фирма. 1992. 211 с.
2. Агрехимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
3. *Артемьева З.С.* Роль органических и органо-минеральных составляющих в формировании фосфатного режима пахотных горизонтов эрозивно-деградированных агродерново-подзолистых почв // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 78. С. 70–86.
4. *Важенин И.Г., Важенина Е.А.* Проблема фосфатов в Забайкалье. Тр. конф. почвоведов Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, 1964. С. 433–441.
5. *Гамзиков Г.П., Мангатаев Ц.Д., Пигарева Н.Н.* Плодородие лугово-черноземных мерзлотных почв. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1991. 130 с.
6. *Герасимова М.И., Лебедева И.И., Хитров Н.Б.* Индексация почвенных горизонтов: состояние вопроса. проблемы и предложения // Почвоведение. 2013. № 5. С. 627–638. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14050098>
7. *Гинзбург К.Е.* Фосфор основных типов почв СССР. М.: Наука, 1981. 244 с.
8. *Диалло Т.Б.* Сорбция фосфат-ионов тропическими и дерново-подзолистыми почвами и влияние фосфорного удобрения на урожай ячменя. Автореф. канд. ... с.-х. наук. СПб., 1993. 27 с.
9. *Ефремов Е.Н.* Плодородие почв и удобрения. Электронный ресурс. AgroXXI.ru. Дата обращения 02.02.2023. <https://doi.org/journal/199804/199804001.pdf>
10. *Карпова Д.В., Чижикова Н.П., Колобова Н.А., Кононенко В.В.* Анализ состояния фосфора в агросерых почвах Владимирского Ополя // Агрехимический вестник. 2016. № 3. С. 15–19.
11. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена. 2004. 342 с.
12. *Курсакова В.С.* Влияние минеральных удобрений на урожайность многолетних трав в условиях засоления // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2019. № 7. С. 45–51.
13. *Макаров М.И.* Соединения фосфора в гумусовых кислотах почвы // Почвоведение. 1997. № 4. С. 458–466.
14. *Мангатаев Ц.Д.* Фосфатный фонд автоморфных почв Западного Забайкалья // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2006. № 4. С. 79–83.
15. *Мангатаев Ц.Д., Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л.* Содержание фосфатов в аллювиальных болотных почвах в сухостепной зоне Забайкалья // Плодородие. 2010. № 3. С. 13–15.
16. *Мангатаев Ц.Д., Пьянкова Н.А., Рузавин Ю.Н.* Содержание фосфатов в целинных и пахотных почвах Западного Забайкалья // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2008. № 4. С. 27–30.
17. *Меркушева М.Г., Убугунов В.Л.* Оценка буферной способности почв Забайкалья к тяжелым металлам // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М., 2002. С. 163.
18. *Минеев В.Г.* Агрехимия. М., 1999. 720 с.
19. Национальная стратегия сохранения биоразнообразия России. М., 2012. 129 с.

20. Панкова Е.И., Новикова А.Ф. Засоленные почвы России (диагностика, география, площади) // Почвоведение. 1995. № 1. С. 73–83.
21. Панкова Е.И., Горохова И.Н. Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 5–33. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-5-33>
22. Почвоведение. Ч. 1. Почва и почвообразование. М.: Высшая школа, 1988.
23. Приемы повышения плодородия почв (известкование. фосфоритование. гипсование): науч.-метод. реком. М.: Росинформагротех, 2021. 116 с.
24. Расширенное воспроизводство плодородия почв в интенсивном земледелии Нечерноземья. М.: ВИУА, 1993. 864 с.
25. Сосорова С.Б. Сорбция фосфат-иона аллювиальной дерновой почвой // Природа Внутренней Азии. Nature of Inner Asia. 2021. № 2–3. С. 64–72.
26. Сосорова С.Б. Сорбция фосфора почвами Западного Забайкалья // Агрохимия. 2022. № 3. С. 3–11.
27. Сосорова С.Б., Меркушева М.Г., Болоньева Л.Н., Балданова А.Л., Убугунов Л.Л. Содержание микроэлементов в солончаках Западного Забайкалья // Почвоведение. 2016. № 4. С. 459–474. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16040146>
28. Тошматова Н.А., Макарова Л.Д. Влияние норм фосфора на динамику его содержания в почве и урожайность люцерны при сульфатном засолении // Докл. ТАСХА. 2013. №3. С. 28–32.
29. Убугунов Л.Л., Лаврентьева И.Н., Меркушева М.Г. Биологическая продуктивность и гумусное состояние почв Иволгинской котловины (Западное Забайкалье) // Почвоведение. 2001. № 5. С. 557–568.
30. Убугунов Л.Л., Лаврентьева И.Н., Убугунова В.И., Меркушева М.Г. Разнообразие почв Иволгинской котловины: эколого-агрохимические аспекты. Улан-Удэ: БГСХА, 2000. 208 с.
31. Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г., Андреева И.М. Натрий в экосистемах Забайкалья и его агрохимическая эффективность. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. 239 с.
32. Убугунов Л.Л., Ральдин Б.Б., Убугунова В.И. Почвенный покров Бурятии как базовый компонент природных ресурсов Байкальского региона. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. 2002. 53 с.
33. Убугунов Л.Л., Убугунова В.И., Мангатаев Ц.Д. Фосфатный фонд основных типов аллювиальных почв бассейна реки Селенги // Почвоведение. 1998. № 1. С. 67–73.
34. Фокин А.Д. Исследования в области кинетики, статистики и динамики сорбции фосфатов в почвах с применением фосфора-32. Автореф. ... дис. канд. хим. наук. М. 1964. 20 с.
35. Шумилова М.А., Петров В.Г. Адсорбционные модели поведения поллютантов в почве Удмуртии // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем. Мат-лы XIX Всерос. Науч.-пр. конф. Киров, 2021. С. 130–134.
36. Электронный ресурс: <https://soil-db.ru/soilatlas/razdel6-funkcii-pochv/sorbcionnye-funkcii-pochv>
37. Asomaning S.K. Processes and Factors Affecting Phosphorus Sorption in Soils://www.intechopen.com/chapters/70866. Al-Rohily et al., 2013. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90719>
38. Beji R., Hamdi W., Kesraoui A., Seffen M. Effects of salts on phosphorus adsorption in alkalize Tunisian soil. Euro-Mediterr // J. Environ. Integr. 2017. V. 2. P. 2.
39. Bolland M.D., Allen D.G., Barrow N.J. Sorption of phosphorus by soils: how it is measured in Western Australia. Department of Primary Industries and Regional Development. Western Australia. Perth. Bulletin, 2003. 4591 p.
40. Börling K. Phosphorus sorption, accumulation and leaching – Effects of long-term inorganic fertilization of cultivated soils. Doctoral thesis. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2003. 39 p.
41. Cantrell I.C., Linderman R.G. Preinoculation of lettuce and onion with VA mycorrhizal fungi reduces deleterious effects of soil salinity // Plant and Soil. 2001. V. 233. P. 269–281.
42. Chaudhary E.H., Ranjha A.M., Gill M.A. Mehdi S.M. Phosphorus requirement of maize in relation to soil characteristics // Int. J. Agric. Biol. 2003. № 5. P. 625–629.
43. Chimdi A., Gebrekidan H., Tadesse A., Kibret K. Phosphorus Sorption Patterns of Soils from Different Land Use Systems of East Wollega. Ethiopia // American-Eurasian J. Scient. Res. 2003. V. 8. P. 109–116. <https://doi.org/10.5829/idosi.ajejr.2013.8.3.12056>
44. Daniel E., Dodor., Kazuhiro Oya. Phosphate sorption characteristics of major soils in Okinawa. Japan // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2000. V. 31. P. 277–288. https://www.researchgate.net/publication/249073919_Phosphate_sorption_characteristics_of_major_soils_in_Okinawa_Japan
45. Ding Z., Kheir AMS., Ali MGM., Ali OAM., Abdelaal AIN., Lin X., Zhou Z., Wang B., Liu B., He Z. The integrated effect of salinity, organic amendments, phosphorus fertilizers, and deficit irrigation on soil properties, phosphorus fractionation and wheat productivity // Sci Rep. 2020. V. 10. P. 2736. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59650-8>
46. Fageria N.K., Moreira A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. // Adv. Agron. 2011. V. 110. P. 251–331.
47. Gaurina-Medjimurec N. Hand book of Research on Advancements in Environmental Engineering. IGI Global, 2014. 660 p
48. Gonzalez-Rodriguez S., Fernandez-Marcos M.L. Phosphate sorption and desorption by two contrasting volcanic soils of equatorial Africa // PeerJ. 2018. V. 6. P. e5820. <https://doi.org/10.7717/peerj.5820>
49. Grattan S.R., Grieve C.M. Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops // Sci. Hortic. 1998. V. 78. P. 127–157.
50. Gregor M. Mullite-corundum-spinel-cordierite-plagioclase xenoliths in the Skaergaard Marginal Border Group: multi-stage interaction between metasediments and basaltic magma // Contrib Mineral Petr. 2005. № 49. P. 96–215.

51. *Sanchez P., Goro U.* The role of phosphorus in agriculture. Symposium proceeding. ASA, CSSA, SSSA. Madison. Wisconsin. USA. 1980. P. 471–514.
52. *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. № 29. P. 685–694.
53. *Scherrer R.A., Howard S.M.* The Use of Distribution Coefficients in Quantitative Structure-Activity Relationships // *J. Medical Chem.* 1977. V. 20. P. 53–58. <https://doi.org/10.1021/jm00211a010>
54. *Uddin R., Baloch P.A., Iqbal S., Bhutto M.A., Nizamani F.K., Solangi A.H., Siddiqui A.A.* Phosphorus Sorption characteristics of four Soil series // *J. Anim. Plant Sci.* 2014. V. 24. P. 1547–1553
55. *Wang Y.T., O'Halloran I.P., Zhang T.Q., Hu Q.C., Tan C.S.* Phosphorus Sorption Parameters of Soils and Their Relationships with Soil Test Phosphorus. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.07.0307>
56. *Wolde Z., Hai W.* Phosphorus sorption Isotherms and External phosphorus requirements of some Soils of southern Ethiopia // *African Crop Sci. J.* 2015. V. 23. P. 89–99. https://www.researchgate.net/publication/277834837_phosphorus_sorption_isotherms_and_external_phosphorus_requirements_of_some_soils_of_southern_ethiopia.

Phosphorus Sorption by Saline Soils of Western Transbaikalia

S. B. Sosorova^{1, *}, M. G. Merkusheva¹, L. N. Boloneva¹, and I. N. Lavrentieva¹

¹*Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, 670047 Russia*

**e-mail: soelma_sosorova@mail.ru*

The sorption of phosphorus by salt marshes of the dry-steppe zone of the Republic of Buryatia from an aqueous solution of KN_2PO_4 in the concentration range from 0.25 to 5.0 mM/L (mmol/L) was studied under static conditions. The interaction time is 24 hours with a soil: solution ratio of 1 : 10. The amount of sorbed phosphorus was calculated from the difference in its content in the initial solutions and in the filtrates of soil suspensions. Based on experimental data, phosphorus adsorption isotherms were constructed by soil and sorption parameters were calculated using the Langmuir and Freundlich equations. Typical and quasi-clay Solonchaks have relatively high sorption properties with respect to phosphorus. The value of the maximum adsorption capacity (A_{max}) in the humus horizons of these soils varied in the range of 23.04–42.74 mM P/kg, in the underlying horizons 16.26–30.39 mM P/kg. In general, all soils, with the exception of the sorov Solonchaks, had an A_{max} value in the range of 17.70–42.74 mM P/kg. A low sorption value of phosphorus was found in the Solonchaks of sorovy. The Langmuir adsorption constant (K_L) varied in the range of 0.3–14.0 l/mmol. Solonchaks dark and typical most strongly bind phosphorus. The Freundlich coefficient (K_F) in the studied soils varied in the humus horizon from 5.34 to 63.43 mM P/kg, in mineral from 1.74 to 22.68 mM P/kg. The distribution coefficient (K_d) ranged from 1.95–145.04 l/kg with high values for quasi-clay Solonchaks and low for sorov Solonchaks. The correlation between K_d and A_{max} was estimated as average ($r = 0.51$), K_d and K_L – high ($r = 0.84$, $p \leq 0.05$). The studied soils according to the values of SPR (the amount of phosphorus that must be sorbed by the soil to maintain a concentration of $\text{P} = 0.2$ mg/kg (0.0065 mM/l) in soil solution) from (0.0723 to 3.4836 mM/kg) refer to weakly absorbing phosphorus. According to the ability to sorb phosphorus, soils form the following decreasing series: quasi-glay solonchaks > typical solonchaks > dark solonchaks > clay solonchaks > alluvial light humus saline > sorov solonchaks.

Keywords: phosphate ions, adsorption, Langmuir equation, Freundlich equation, Solonchaks