

УДК 631.48:930.26

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОСФАТНОЙ АКТИВНОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННО-ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ПОЧВ

© 2020 г. Н. Н. Каширская^а, *, Л. Н. Плеханова^а, Е. В. Чернышева^а,
М. В. Ельцов^а, С. Н. Удальцов^а, А. В. Борисов^а

^аИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, 2, Московская область, Пущино, 142290 Россия

*e-mail: nkashirskaya81@gmail.com

Поступила в редакцию 17.03.2019 г.

После доработки 17.06.2019 г.

Принята к публикации 20.06.2019 г.

Обобщены данные по фосфатной активности (ФА) почв зонального ряда, интразональных почвах, одновременных погребенных почвах и культурных слоях археологических памятников. Проанализирована изменчивость этого показателя в пределах почвенных комплексов. Максимальные значения ФА были зафиксированы в верхнем горизонте серых лесных почв (Eutric Retisols), а минимальными значениями характеризовались бурые полупустынные почвы бугров Бэра (Haplic Calcisols). В солонцах (Solonetz) по сравнению со светло-каштановыми почвами (Cambisols) было отмечено более широкое варьирование ФА в верхнем горизонте; при этом средняя величина ФА в горизонте А1 в солонцах была в 1.5 раза выше, чем в светло-каштановых почвах. Максимальные значения ФА в профиле солонцов были зафиксированы в верхнем 2-сантиметровом слое. В горизонте В1 в светло-каштановых почвах (Cambisols и Calcisols) наблюдалось увеличение фосфатной активности, а в солонцах (Solonetz) было отмечено ее снижение в иллювиальной части профиля по сравнению с верхним горизонтом. В разновозрастных подкурганых почвах отмечен повышенный уровень ФА в палеопочвах, погребенных в гумидные эпохи по сравнению с палеопочвами аридных эпох. Культурные слои древних поселений отличаются максимальной вариабельностью значений ФА. В ряде случаев этот показатель коррелирует с содержанием фосфатов, но только в тех слоях, где имело место поступление органических материалов; в слоях, где были выявлены угли и зола, при высоком содержании фосфатов были зафиксированы низкие величины ФА.

Ключевые слова: ферментативная активность, фосфатазы, погребенные почвы, культурные слои археологических памятников

DOI: 10.31857/S0032180X20010098

ВВЕДЕНИЕ

Ферментативная активность почвы относится к важнейшим показателям почвенного плодородия [24] и часто используется в качестве биоиндикатора, позволяющего диагностировать состояние окружающей среды и прогнозировать изменения в экосистемах [38]. К ферментам, активность которых используется для диагностики продуктивности пахотных угодий и при этом достаточно широко варьирует в почвах естественных биотопов, относятся фосфатазы [7, 23, 32]. Фосфатная активность (ФА) в природных почвах земного шара, по обзору глобальных измерений этого показателя, варьирует в пределах четырех порядков от 0.01 до 79 мкмоль нитрофенола/(г почвы ч) [32]. Из почвенных фосфатаз наиболее изучены фосфомоноэстеразы, способные действовать на низкомолекулярные фосфорные соединения и проявляющие активность как в кислой, так и щелоч-

ной среде. В меньшей степени исследованы фосфодиэстеразы, ответственные за первые стадии деградации фосфолипидов и нуклеиновых кислот [38].

ФА зависит от типа почвы, от присутствия ингибиторов или активаторов, от состава растительного и микробного сообщества [37]. Она связана с деятельностью практически всех почвенных микроорганизмов, но только некоторые из них образуют большое количество внеклеточных фосфатаз [9]. Основными продуцентами для щелочных фосфатаз, преобладающих в нейтральных и щелочных почвах, являются бактерии, а для кислых фосфатаз, распространенных в кислых почвах, — растения, грибы и в меньшей степени бактерии [24, 34].

Особую группу ферментов фосфорного цикла составляют фитазы [17, 25], способные осуществ-

лять гидролитическое расщепление фитина, содержание которого в почве достигает до 80% от всего пула органических фосфатов [14]. Фитазы активно выделяются в почву микроскопическими грибами, и в меньшей степени бактериями. Слабая фитазная активность обнаружена в корнях растений, однако фермент не секретируется в ризосферу, и растения не могут самостоятельно усваивать связанный фосфор из фитатов почвы [17].

Одним из факторов, непосредственно влияющих на ФА, является обеспеченность почвы подвижными фосфатами, доступными для растений и микроорганизмов. Как отмечают многие исследователи, более высокая обеспеченность почвы подвижным фосфором приводит к снижению ФА [15, 24]. Это связано с тем, что минеральный фосфор необходим для жизнедеятельности почвенных микроорганизмов. Поэтому почвенная микрофлора при избытке доступного фосфора уменьшает выработку фосфатаз, а при его недостатке активизирует их синтез для более эффективного превращения труднодоступных органических форм фосфора в легкодоступные минеральные формы [20]. При этом потенциальная способность почвенной микробиоты высвобождать доступный фосфор с помощью фосфатаз, прежде всего, зависит от таких факторов, как содержание азота в почве и оптимальное соотношение среднегодовой температуры и количества осадков [32].

Содержание органического углерода также относится к ряду показателей, оказывающих влияние на ФА [32]. Органическое вещество и фосфаты являются конкурентами в борьбе за сорбционные места на поверхности почвенных минеральных частиц. Показано, что увеличение длительности и дозы внесения органических удобрений уменьшает количество активных сорбционных позиций и, таким образом, увеличивает доступность фосфора для растений [21]. Антропогенная деятельность может приводить к существенному увеличению содержания органического вещества в почве, что в свою очередь приводит к росту численности микроорганизмов, ответственных за его утилизацию, и как следствие – к увеличению ферментативного пула, обеспечивающего минерализацию органических субстратов. Известно, что антропогенно-преобразованные почвы и культурные слои археологических памятников характеризуются повышенными величинами содержания фосфора [19, 30]. При этом в ряде случаев имеет место высокая ферментативная активность культурных слоев, свидетельствующая о длительной сохранности почвенных ферментов и, по-видимому, связанная с увеличением ферментативного пула, вследствие антропогенного накопления органических субстратов [11, 28].

На сегодняшний день известны многие работы, посвященные исследованиям ФА в естествен-

ных почвах [32], в почвах современных пахотных угодий [7, 21], в почвах нарушенных экосистем [29, 35]. Показано наличие ФА в мерзлотных и озерных отложениях возрастом около 9–13 тыс. лет [36], а также в палеопочвах под грунтовыми насыпями [26] и в культурных слоях древних поселений [11] возрастом 3000–4500 лет. До настоящего времени не предпринимались попытки оценить варьирование ФА в ряду разновозрастных погребных почв, а также в почвах древних поселений и пахотных угодий. В археологическом контексте исследование ФА представляет особый интерес, так как при участии фосфатаз происходит мобилизация органического фосфора – элемента, широко используемого в археологической практике [12, 30].

Цель работы – выявить хроногеографические изменения фосфатазной активности в естественных почвах, погребенных под курганными насыпями, и в антропогенно-преобразованных почвах, включающих культурные слои археологических памятников.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования служили современные зональные и интразональные почвы, разновозрастные подкурганные каштановые палеопочвы, а также почвы и культурные слои древних поселений.

Свойства верхнего горизонта зональных и интразональных почв представлены в табл. 1.¹ В ряду зональных почв были исследованы серые лесные почвы (Eutric Retisols) в Республике Татарстан (объект 1), и в Московской области (объект 2); чернозем выщелоченный (Luvic Chernozem), Липецкая область (объект 3); чернозем обыкновенный (Haplic Chernozem), Челябинская область (объект 4); бурая полупустынная почва на бугре Бэра (Haplic Calcisol), Астраханская область (объект 5). Среди интразональных почв были изучены дерново-карбонатная эродированная почва (Rendzic Leptosol), Удмуртская Республика (объект 6); горно-луговая почва (Umbric Leptosol), Республика Адыгея (объект 7), аллювиальная дерновая почва (Umbric Fluvisol), Московская область (объект 8).

В ряду современных степных почв (табл. 2) и разновозрастных палеопочв, погребенных под курганными насыпями (табл. 3) анализировали образцы из горизонтов A1, B1 и B2. Эта группа объектов располагалась в пределах Ергенинской возвышенности, на территории Волгоградской и Ростовской областей. Для оценки варьирования ФА в почвах одного типа исследовали светло-каштановые почвы различной степени солонцеватости (Cambisols или Calcisols, объекты 9–15) и

¹ Далее в таблицах и рисунках вместо названия и месторасположения той или иной почвы будет приводиться ее номер.

Таблица 1. Характеристика верхнего горизонта почв зонального ряда и интразональных почв

Объект	C _{орг} , %	pH H ₂ O	CaCO ₃ , %	Содержание фракций, %	
				<0.001 мм	<0.01 мм
1. Серая лесная почва	—	6.4	—	14	9
2. Серая лесная почва	3.80	6.7	0.12	19	34
3. Чернозем выщелоченный	8.19	3.6	3.96	22	39
4. Чернозем обыкновенный	2.80	6.4	0.60	6	17
5. Бурая полупустынная почва	0.24	8.1	1.20	10	16
6. Дерново-карбонатная эродированная почва	4.20	6.9	0.52	31	53
7. Горно-луговая почва	4.70	7.2	0.11	29	52
8. Аллювиальная дерновая почва	1.20	6.1	—	—	—

солонцы (Solonetz) с различной мощностью верхнего горизонта (объекты 16–28).

Для оценки варьирования ФА на микроуровне в пределах верхнего горизонта исследовали этот показатель в каждом сантиметре горизонта А1 в современных средних солонцах (объекты 27 и 28).

Для оценки варьирования ФА в погребенных палеопочвах, расположенных под общей курганной насыпью, исследовали почвенный комплекс, вскрытый при раскопках кургана I в. н.э., на территории курганного могильника Перегрузное, в зоне сухих степей (Волгоградская область). В пределах этого комплекса были изучены лугово-каштановая почва (объект 29), светло-каштановая солонцеватая почва (объект 30), солонец средний (объект 31) и солонец корковый (объект 32).

Для выявления изменчивости ФА в степных палеопочвах, погребенных под разновозрастными курганами, был составлен хроноряд, включающий светло-каштановые почвы и солонцы в пределах курганных могильников Песчаный-V и Темрта-I (Ростовская область). В качестве фоновой почвы выбран современный солонец каштановый средней незасоленности (объект 26). Для четырех палеопочв хроноряда получены радиоуглеродные датировки. В порядке уменьшения возраста погребения палеопочвы образуют следующий хроноряд: светло-каштановая почва (объект 33) – 5340 ± 50 ВР, светло-каштановая почва (объект 34) – 4255 ± 45 ВР, светло-каштановая солонцеватая почва (объект 35) – 4171 ± 32 ВР и солонец корковый каштановый (объект 36) – 3965 ± 35 ВР. Также в составе этого могильника был исследован солонец мелкий каштановый, погребенный 1300–1400 л.н. (объект 37).

Для изучения влияния древней антропогенной деятельности на ФА почв исследовали культурные слои разновозрастных поселений. Максимальный возраст – около 7000 лет – зафиксирован для поселения эпохи энеолита Мешоко (Республика Адыгея). Культурный слой поселения хорошо проработан почвообразованием, без стратиграфических различий, представлен недифференцированной толщей темно-серого суглинка глыбистой структуры мощностью до 140 см, с

большим количеством керамики, костей и камней от развалов построек (объект 38).

Для сравнения исследовали культурные слои более молодого возраста. Слои средневековых городищ Учкакар (Удмуртская Республика) и Болгар (Республика Татарстан), возрастом 700–800 лет, были проработаны почвообразованием только в верхней части профиля. Мощность антропогенных напластований городища Учкакар (объект 39), обогащенных керамикой и костным материалом, со следами пожаров и остатками жилищ, достигала 130 см. На территории городища Болгар исследовали два образца культурного слоя, приуроченные к участкам городища с различным характером антропогенной деятельности. Максимальной антропогенной нагрузкой характеризовался торгово-административный центр городища, где изучали культурный слой мощностью до 130 см, включающий 15 стратиграфических слоев (объект 40). Другой объект представлял собой культурный слой жилой зоны глубиной 85 см, с менее дифференцированным профилем, без следов пожаров и развалов построек (объект 41). При хорошо выраженной стратиграфии профиля образцы отбирали послойно, при отсутствии стратиграфических различий – из каждых 10 см.

Методы исследований

Гранулометрический состав почв, содержание гумуса, кислотность и содержание солей определяли стандартными методами [1] в ЦКП ИФХиБПП РАН; здесь же проводили оценку содержания валового фосфора с помощью рентгенфлуоресцентного анализатора МАКС-GV.

ФА почвенных образцов оценивали спектрофотометрическим методом Галстяна–Арутюнян [25] по оптической плотности раствора фенолфталеина, образованного из фенолфталеинфосфата натрия под действием почвенных фосфатаз. Этот метод широко распространен, наряду с общепринятым в мировой практике нитрофенольным методом. Последний в качестве универсальных единиц измерения ФА предлагает $\mu\text{моль нитрофенола}/(\text{г ч})$ [32]. В ряде отечественных

Таблица 2. Характеристика современных каштановых почв и солонцов степной зоны

Объект	Горизонт, глубина, см	C _{орг} , %	pH H ₂ O	CaCO ₃ , %	Сумма солей, %	Содержание фракций, %	
						<0.001 мм	<0.01 мм
Каштановые почвы							
9. Светло-каштановая несолонцеватая незасоленная почва (Cambisol)	A1, 0–15	0.66	8.2	2.89	0.10	27	48
	B, 15–33	0.68	8.1	2.48	0.04	33	60
	B2, 33–53	0.73	8.2	2.48	0.03	36	54
10. Светло-каштановая солонцеватая глукосолончаковатая почва (Cambisol)	A1, 0–8	1.19	8.0	2.07	0.04	16	35
	B1, 8–20	1.02	8.5	2.07	0.03	24	42
	B2ca, 20–60	0.81	8.3	4.54	0.09	27	46
11. Светло-каштановая солонцеватая глубокосолончаковатая почва (Calcicol)	A1, 0–12	1.74	8.2	2.88	0.06	15	29
	B1, 12–25	1.15	8.6	3.73	0.07	29	46
	B2ca, 25–40	0.63	9.1	16.51	0.08	31	60
12. Светло-каштановая несолонцеватая почва (Calcicol)	A1, 0–16	2.61	7.1	1.30	0.05	10	29
	B1, 16–28	1.34	7.4	2.20	0.05	24	44
	B2, 28–35	0.81	8.1	16.60	0.06	25	52
13. Светло-каштановая солонцеватая глукосолончаковатая почва (Cambisol)	A1, 0–10	1.74	7.95	1.66	0.06	12	30
	B1, 10–23	0.81	8.57	2.48	0.07	32	45
	B2ca, 23–38	0.89	8.64	2.88	0.07	43	58
14. Светло-каштановая солонцеватая почва (Calcicol)	A1, 0–15	2.49	7.3	1.2	0.05	15	35
	B1, 15–30	1.32	7.9	3.1	0.08	35	55
	B2, 30–40	1.02	8.1	18.7	0.07	23	52
15. Светло-каштановая солонцеватая глукосолончаковатая почва (Cambisol)	A1, 0–12	2.07	8.1	1.77	0.09	14	26
	B1, 12–26	0.91	8.6	1.93	0.10	34	46
	B2, 26–40	0.66	8.8	9.51	0.06	28	45
Солонцы							
16. Солонец средний солончаковатый	A1, 0–10	2.25	7.9	7.90	0.04	9	25
	B1, 10–23	0.93	9.3	9.30	0.10	45	60
	B2, 23–33	0.43	9.5	9.50	0.31	29	58
17. Солонец средний солончаковатый	A1, 0–11	0.71	8.8	1.73	0.06	7	25
	B1, 11–25	0.93	9.4	2.41	0.25	26	52
	B2, 25–30	0.45	9.1	5.52	0.66	28	55
18. Солонец мелкий глубокосолончаковатый	A1, 0–9	1.64	7.7	1.59	0.05	11	30
	B1, 9–20	1.14	8.4	2.81	0.14	46	59
	B2, 20–35	0.97	9.2	17.07	0.19	36	58
19. Солонец средний глубокосолончаковатый	A1, 0–12	1.98	7.8	1.70	0.05	12	24
	B1, 12–29	1.34	8.1	2.90	0.07	34	50
	B2, 29–38	0.84	8.5	11.80	0.10	27	47
20. Солонец корковый солончаковатый	A1, 0–5	2.78	8.3	1.80	0.05	15	27
	B1, 5–18	1.71	9.2	4.80	0.12	45	57
	B2ca, 18–36	0.85	8.9	14.40	0.42	36	53
21. Солонец корковый солончаковатый	A1, 0–4	2.75	7.4	2.75	0.04	8	24
	B1, 4–15	1.60	8.7	1.60	0.17	25	52
	B2, 15–25	0.80	8.5	0.80	0.66	30	56
22. Солонец средний глубокосолончаковатый	A1, 0–12	1.64	7.93	1.69	0.01	14	23
	B1, 12–25	1.00	8.82	5.06	0.01	45	57
	B2ca, 25–34	0.63	9.44	16.86	0.05	35	52
23. Солонец средний солончаковатый	A1, 0–11	0.93	7.8	2.1	0.05	12	28
	B1, 11–22	0.91	9.2	3.7	0.24	36	53
	B2ca, 22–30	0.52	9.3	14.9	0.44	23	41
24. Солонец средний солончаковатый	A1, 0–11	0.90	7.5	1.50	0.08	8	22
	B1, 11–29	0.60	8.2	2.30	0.14	24	35
	BC, 29–65	0.60	8.2	2.30	0.29	23	39
25. Солонец средний глубокосолончаковатый	A1, 0–10	1.40	7.4	1.70	0.11	8	25
	B1, 10–27	0.70	7.6	1.70	0.05	24	38
	BCca, 27–40	0.70	8.4	20.30	0.09	20	41

Таблица 2. Окончание

Объект	Горизонт, глубина, см	C _{орг} , %	pH H ₂ O	CaCO ₃ , %	Сумма солей, %	Содержание фракций, %	
						<0.001 мм	<0.01 мм
26. Солонец средний незасоленный	A1, 0–11	0.81	7.9	1.70	0.10	17	31
	B1, 11–29	0.77	8.1	1.70	0.07	26	39
	BCca, 29–65	0.11	8.9	10.70	0.03	13	24
27. Солонец средний глубокосолончако- ватый	A1, 0–10	2.12	7.6	0.23	–	12	24
28. Солонец средний глубокосолончако- ватый	A1, 0–10	2.23	7.3	0.36	–	18	26

Таблица 3. Характеристика подкурганных степных каштановых палеопочв и палеосолонцов

Объект	Горизонт, глубина, см	C _{орг} , %	pH H ₂ O	CaCO ₃ , %	Сумма солей, %	Содержание фракций, %	
						<0.001 мм	<0.01 мм
Курганный могильник Перегрузное							
29. Лугово-каштановая почва	A1, 0–7	0.87	6.9	2.06	0.02	10	30
	B1 ¹ , 7–13	0.70	6.7	1.69	0.02	32	47
	B1 ² , 13–25	0.68	7.9	5.81	0.01	32	59
	B2ca, 25–47	0.58	8.1	18.17	–	–	–
30. Светло-каштановая солон- цеватая почва (Calcisol)	A1, 0–19	0.42	7.7	1.77	0.12	19	36
	B1, 19–41	0.49	7.5	2.16	0.05	27	51
	B2ca, 41–58	0.44	7.9	17.62	0.05	34	56
31. Солонец средний	A1, 0–15	0.50	7.8	2.16	0.14	15	34
	B1, 15–42	0.53	7.7	2.16	0.01	38	54
	B2ca, 42–59	0.42	8.0	19.77	0.08	32	58
32. Солонец корковый	A1, 70–74 0–4	0.28	7.7	1.41	0.24	11	25
	B1, 74–914–21	0.64	8.4	3.52	0.32	33	50
	B2ca, 21–35	0.37	8.5	16.19	0.36	30	53
Курганные могильники Песчаный-V и Темрта-I							
33. Светло-каштановая почва (Cambisol)	A1, 0–7	0.42	8.1	2.40	0.63	16	29
	B1, 7–22	0.48	8.0	3.20	0.70	20	35
	BC1, 22–70	0.17	8.3	9.20	0.32	12	21
34. Светло-каштановая почва (Cambisol)	A1, 0–4	0.41	9.7	6.00	0.55	19	31
	B1, 4–14	0.30	9.3	2.30	0.09	22	35
35. Светло-каштановая солон- цеватая почва (Cambisol)	BC1, 14–35	0.31	8,5	7.90	0.12	19	31
	A1, 0–10	0.28	8.6	1.70	0.41	12	26
	B1, 10–27	0.39	8.6	2.30	0.26	20	35
36. Солонец корковый	B2ca, 27–45	0.35	8.4	8.00	1.54	21	38
	A1, 0–5	0.25	8.3	1.90	0.84	6	22
	B1, 5–26	0.35	8.4	2.30	0.68	22	32
37. Солонец мелкий	BC1, 26–56	0.19	8.9	16.50	0.90	23	37
	A1, 0–6	0.32	9.1	2.80	0.09	18	31
	B1, 6–28	0.49	9.3	2.10	0.11	23	34
	BC1, 28–100	0.44	8.4	4.90	0.10	14	24

публикаций ФА почв измеряется по шкале Гапонюк–Малаховой в мг P₂O₅/(10 г почвы ч) [8]. В настоящей работе использовали более дробные единицы измерения – мкг P₂O₅/(г ч), оптимальные для характеристики погребенных почв с низкой биологической активностью.

Статистическую обработку полученных данных проводили стандартными методами [6, 16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фосфатазная активность современных почв.

В табл. 4 представлены результаты оценки ФА верхнего горизонта исследованных зональных почв и сравнение их с литературными данными. В ряду зональных почв ФА верхнего горизонта изменялась в пределах 2 порядков – от 2.8 до 287 мкг P₂O₅/(г ч). В верхнем горизонте серых лесных

Таблица 4. Сравнение фосфатазной активности верхнего горизонта зональных почв с литературными данными

Фосфатазная активность, мкг P ₂ O ₅ /(г ч)		Фосфатазная активность, авторские единицы измерения	Источник
данное исследование	литературные данные		
Серые лесные почвы			
95–287	335–500	0.67–1 мг P ₂ O ₅ /(г 2 ч)	[10]
Черноземы и черноземовидные почвы			
66–125	549	1.23 мг фенолфталеина/(г ч)	[23]
	159	3.82 мг P ₂ O ₅ /(г 24 ч)	[18]
	20–150	0.2–1.5 мг P ₂ O ₅ /10 (г ч)	[3]
	310–360	0.31–0.36 мг P ₂ O ₅ /(г ч)	[13]
Каштановые почвы			
–	340	3.4 мг P ₂ O ₅ /10 (г ч)	[2]
	192	4.2 мг P/100 (г ч)	[7]
Светло-каштановые почвы			
12–143	190	1.9 мг P ₂ O ₅ /10 (г ч)	[2]
Бурые полупустынные почвы бугров Бэра			
2.8–5.3	–	–	
Почвы сухих тропических лесов			
–	2.3–9.8	4.5–19.3 мкг нитрофенола/(г ч)	[35]
Почвы пустынь			
–	0.04	0.08 мкг нитрофенола/(г ч)	[29]

почв были зафиксированы наибольшие значения ФА, в черноземах и черноземовидных почвах они были в 1.5–2 раза меньше, чем в серых лесных, а в светло-каштановых почвах широко варьировали от 12 до 143 мкг P₂O₅/(г ч). Известно, что плодородие каштановых почв зависит от широкого спектра взаимосвязанных показателей, к которым относятся влагообеспеченность корнеобитаемого почвенного слоя, гранулометрический состав, солонцеватость и мицелярная карбонатность [22].

Минимальными значениями ФА от 2.8 до 5.3 мкг P₂O₅/(г ч) характеризовались бурые полупустынные почвы бугров Бэра.

Сравнение с литературными данными показало высокую сходимость результатов оценки ФА для серых лесных почв, черноземов и светло-каштановых почв. Бурые полупустынные почвы бугров Бэра по показателю ФА были сходны с почвами засушливых регионов [35].

Наименьшие величины ФА, зафиксированные в антропогенно-нарушенных пустынных почвах Нигерии [29], были в 2 раза ниже по сравнению с минимальной активностью этого фермента в базе

данных [32]. Средняя величина ФА в почвах засушливых и полузасушливых регионов, согласно рассматриваемой базе данных, составляет 4.28 мкмоль нитрофенола/(г ч) (303.88 мкг P₂O₅/(г ч)), что согласуется с нашими данными, полученными для светло-каштановых почв.

Результаты оценки ФА верхнего горизонта интразональных почв представлены в табл. 5. Величины данного показателя наиболее широко варьировали в каштановых солонцах – от 5.3 до 248 мкг P₂O₅/(г ч).

Статистическую обработку результатов оценки ФА, в связи с содержанием органического углерода в почвах и степенью их засоленности, проводили для светло-каштановых почв и солонцов (рис. 1). В верхнем горизонте каштановых почв ФА варьировала значительно слабее по сравнению с верхним горизонтом солонцов. При этом как для светло-каштановых почв, так и для солонцов отмечено близкое к равномерному распределение величин ФА в пределах выборки. В целом, для верхнего горизонта солонцов отмечено большее среднее значение ФА по сравнению с верхним горизонтом светло-каштановых почв.

Содержание органического углерода в светло-каштановых почвах и солонцах варьировало в одних и тех же пределах, при этом от 25 до 75% выборки светло-каштановых почв характеризовались значительно более узким диапазоном варьирования по сравнению с аналогичной частью выборки солонцов. Уменьшение содержания органического углерода в горизонте В1 светло-каштановых почв не приводило к снижению ФА, как это было показано для солонцов. Для светло-каштановых почв в

Таблица 5. Фосфатазная активность верхнего горизонта интразональных почв

Почвы	Фосфатазная активность, мкг P ₂ O ₅ /(г ч)
Дерново-карбонатные	25–61
Горно-луговые	52–74
Аллювиальные дерновые	20
Солонцы каштановые	5.3–248

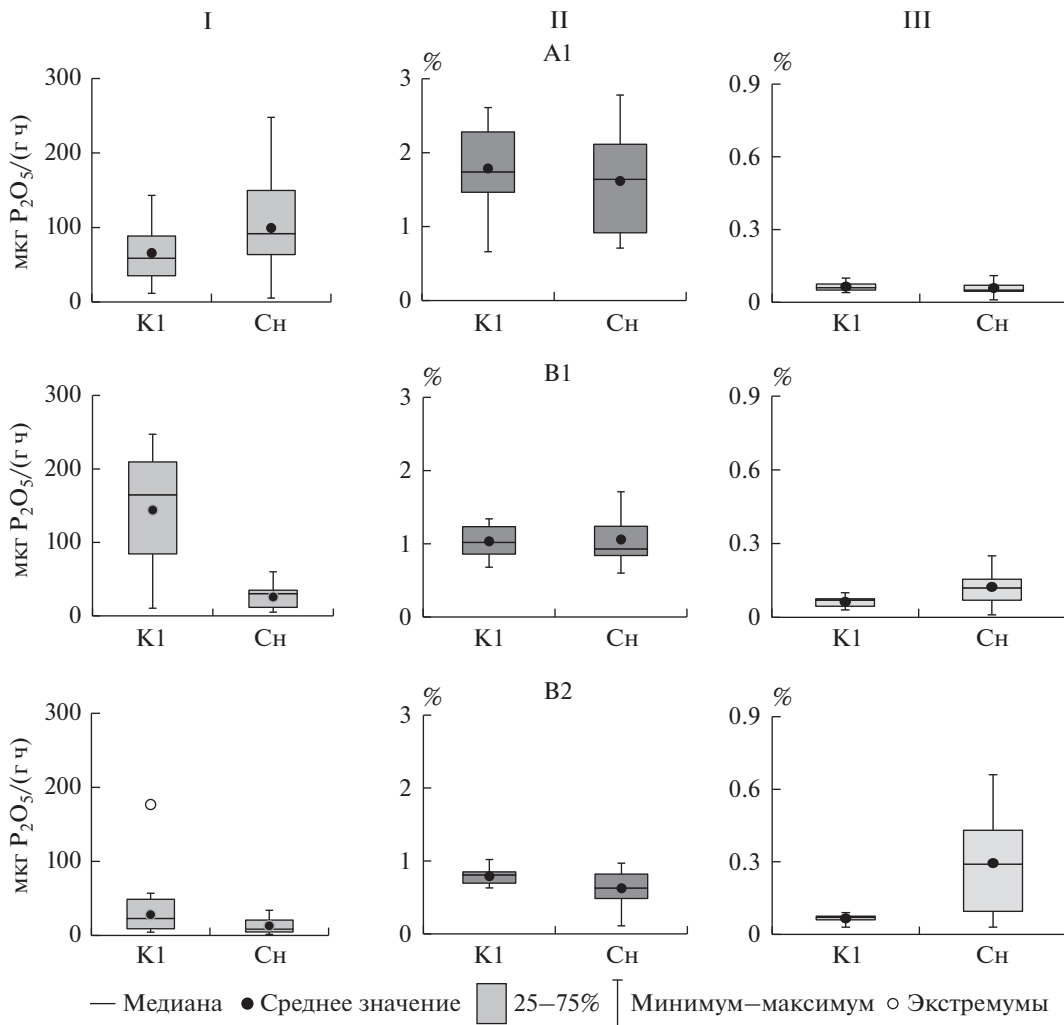


Рис. 1. Фосфатазная активность (I), содержание органического углерода (II) и степень засоленности по плотному остатку водной вытяжки (III) в отдельных горизонтах светло-каштановых почв (K1, объекты 9–15, $n = 7$) и солонцов (Ch, объекты 16–28, $n = 13$).

горизонте В1 фиксировался максимальный разброс величин данного показателя, связанный с наибольшей неоднородностью выборки, включающей почвы различной степени солонцеватости. При этом засоленность иллювиального горизонта светло-каштановых почв была невелика и варьировала значительно слабее по сравнению с аналогичным показателем в солонцах.

Дальнейшее уменьшение ФА в почвенном профиле для солонцов было выражено в большей степени, чем для светло-каштановых почв, и сопровождалось в солонцах увеличением засоленности горизонта В2.

Таким образом, изменчивость фосфатазной активности в горизонтах В1 и В2 солонцов связана, по-видимому, с уменьшением содержания органического углерода и увеличением степени засоленности. Значительное увеличение ФА в горизонте В1 светло-каштановых почв может быть

связано с тем, что почвенное микробное сообщество в солонцовом горизонте испытывает недостаток фосфора при влиянии обменного Na^+ и других обменных катионов. Положительная корреляция активности щелочной фосфатазы с содержанием обменных Na^+ и Ca^{2+} показана для засоленных пастбищных почв [31].

Результаты исследования изменений ФА с глубиной в пределах горизонта А1 в солонцах средних глубокосолончаковатых (объекты 27 и 28) представлены на рис. 2. Максимальные значения ФА в обоих случаях зафиксированы в верхнем двухсантиметровом слое горизонта А1.

Фосфатазная активность палеопочв, погребенных под разновозрастными курганными насытями

Результаты оценки ФА палеопочв погребенного почвенного комплекса I в. н.э. (сухостепная зона, Волгоградская область, курганный могиль-

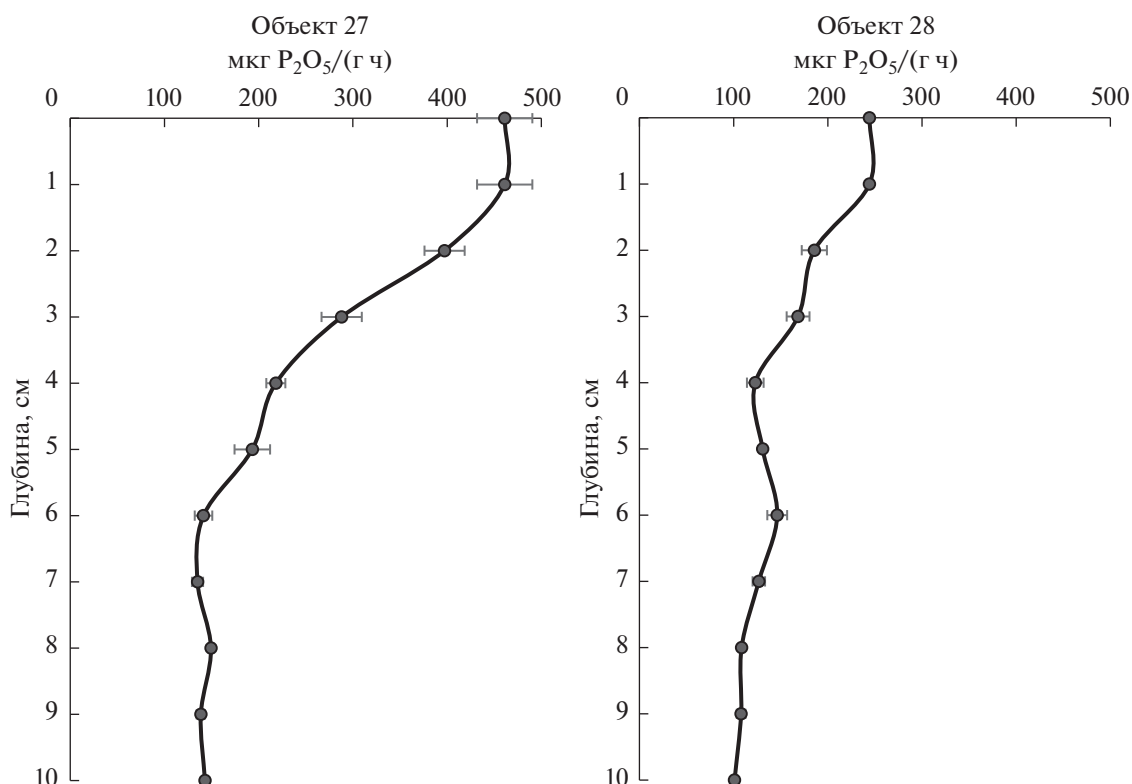


Рис. 2. Изменения фосфатазной активности с глубиной в пределах горизонта A1 солонцов каштановых средних.

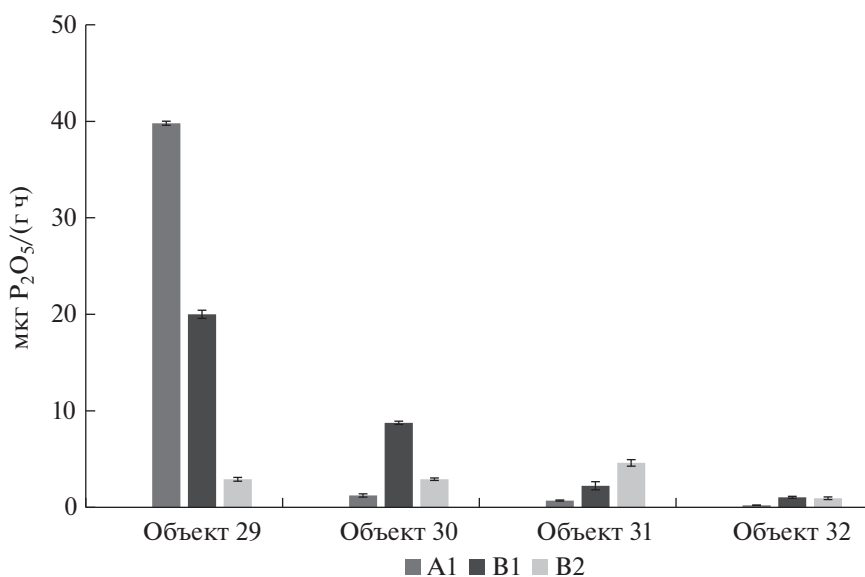


Рис. 3. Фосфатазная активность в подкурганных почвах погребенного комплекса I в. н.э. Объект 29 – лугово-каштановая почва, объект 30 – светло-каштановая солонцеватая почва, объект 31 – солонец средний, объект 32 – солонец корковый.

ник Перегрузное) представлены на рис. 3 (объекты 29–32). Максимальными величинами данного показателя характеризовалась лугово-каштановая погребенная почва. Здесь величины ФА уменьшались в профиле от 40 до 3 мкг $P_2O_5/(г ч)$ и составляли в верхнем горизонте около 70% от

уровня зональных современных почв. В более глубоких горизонтах этот показатель снижался до 10–17% от современного уровня. В светло-каштановой почве, солонце среднем и солонце корковом, погребенных в составе рассматриваемого комплекса, ФА в горизонте A1 была на 1–2 по-

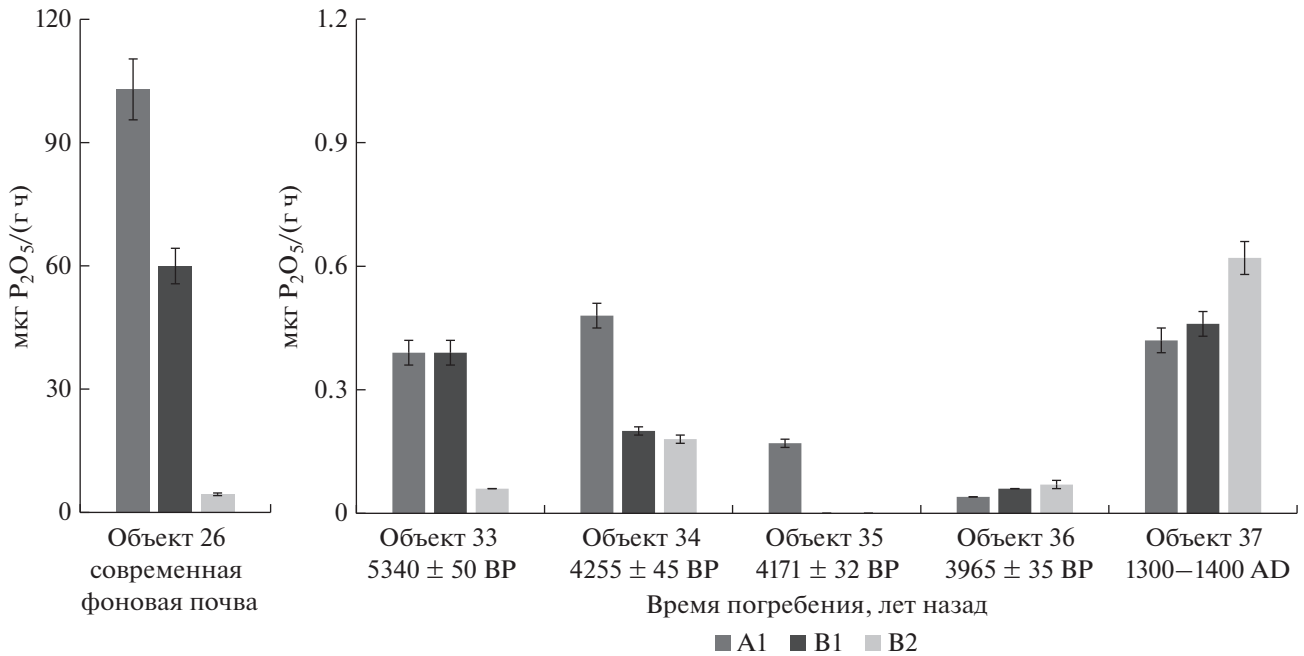


Рис. 4. Фосфатазная активность в современной каштановой солонце (объект 26) и в разновозрастных каштановых почвах и солонцах, погребенных под курганами эпох энеолита (объект 33), бронзы (объекты 34–36) и средневековья (объект 37) в пустынно-степной зоне (Ростовская область, курганные могильники Песчаный-V и Темрта-I).

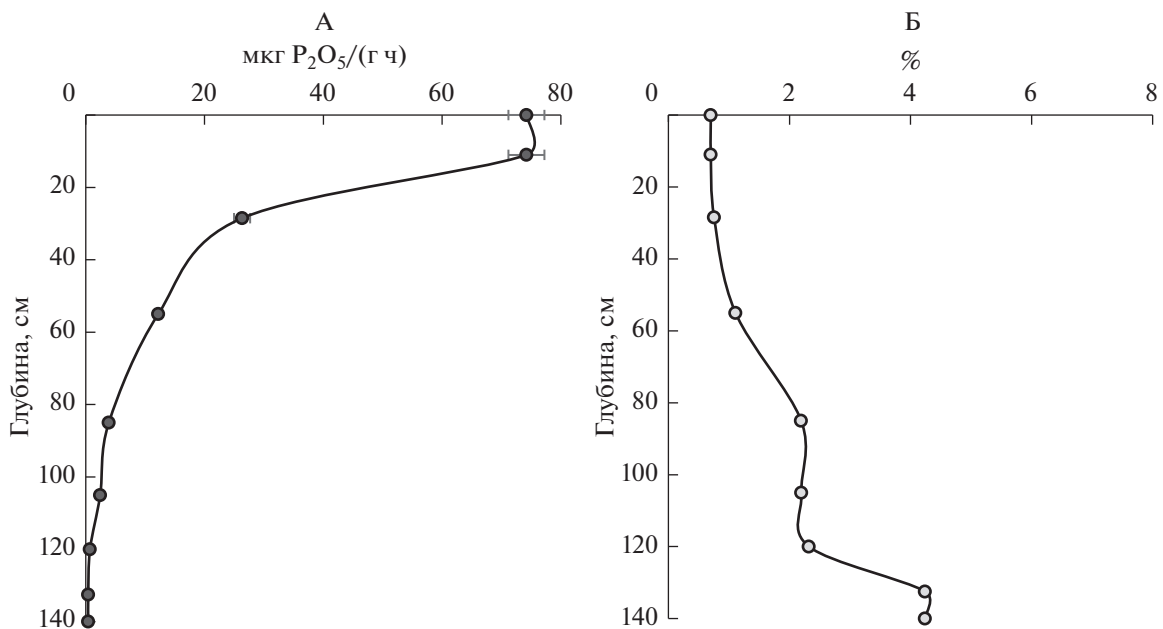


Рис. 5. Фосфатазная активность (А) и содержание валового фосфора (Б) в культурном слое энеолитического укрепления Мешоко (объект 38).

рядка, а в горизонте В1 в 2–20 раз ниже по сравнению с аналогичными горизонтами лугово-каштановой почвы. В горизонтах В2 значения ФА были близки для всех палеопочв, за исключением коркового солонца, где были отмечены наименьшие ее величины. В верхнем горизонте коркового солонца ФА практически не выявлялась. По-ви-

димому, лугово-каштановая почва характеризовалась как высокой степенью сохранности фермента, так и достаточно высоким исходным уровнем ФА по сравнению с остальными почвами комплекса. Высокие величины ФА в лугово-каштановой почве могут быть связаны с большим содержанием органического углерода в профиле, от

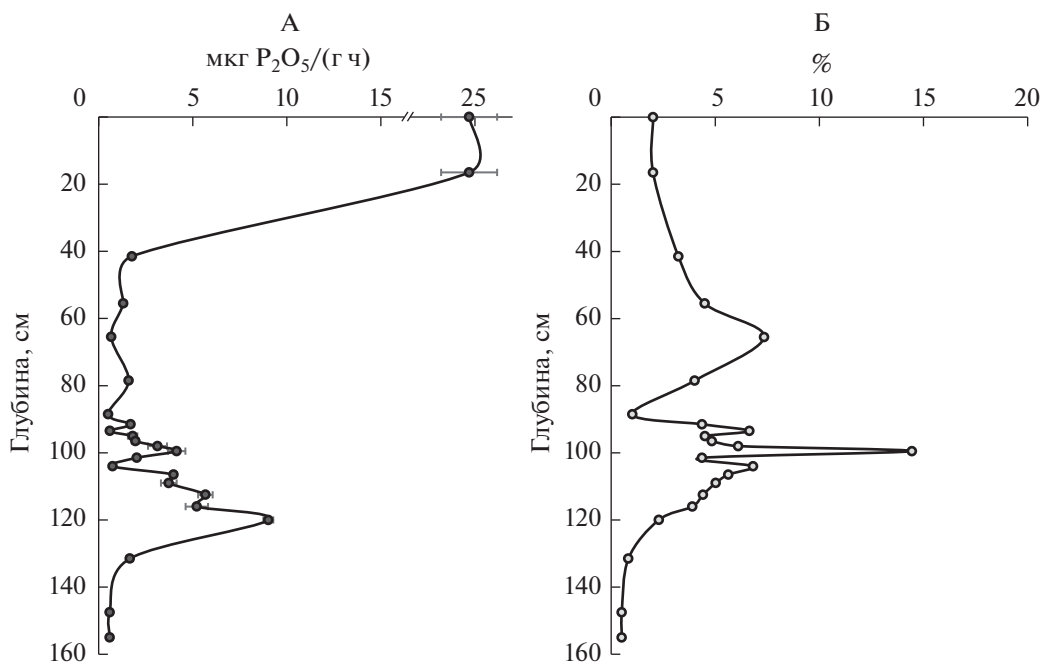


Рис. 6. Фосфатазная активность (А) и содержание валового фосфора (Б) в культурных слоях городища Учцакар, IX–XIII вв. (1100–700 л.н.), Удмуртская Республика (объект 39).

до 0.58% в горизонте В2 до 0.87% в верхнем горизонте (табл. 2).

Результаты определения ФА в разновозрастных палеопочвах курганных могильников “Песчаный” и “Темрта” представлены на рис. 4. В современном фоновом солонце (объект 26), ФА в горизонтах А1 и В1 соответственно составляла 103 и 60 $\mu\text{g P}_2\text{O}_5/(\text{г ч})$; в горизонте В2 величина данного показателя уменьшалась в 15–20 раз. В палеопочвах отмечен низкий уровень сохранности ФА: от 0.03 до 0.5% от современного уровня в верхних горизонтах, и около 1.5% в горизонте В2.

Наиболее древние почвы хроноряда, датированные 5340 ± 50 ВР (объект 29) и 4255 ± 45 ВР (объект 30), характеризовались более высоким уровнем ФА по сравнению с палеопочвами, датированными 4171 ± 32 ВР (объект 31) и 3965 ± 35 ВР (объект 32). Время погребения палеопочв с наименьшими показателями ФА относится к наиболее засушливым периодам эпохи бронзы [5, 27, 33]. В профиле солонца эпохи средневековья (объект 33), погребение которого относится к гумидному периоду [4], уровень ФА заметно увеличивался по сравнению с предшествующими палеопочвами хроноряда.

Таким образом, на уровне тенденции, можно отметить увеличение ФА в палеопочвах гумидных эпох по сравнению с палеопочвами, время погребения которых относится к периодам климатической аридизации.

Фосфатазная активность культурных слоев разновозрастных археологических памятников

В культурном слое наиболее древнего из всех исследованных нами памятников – энеолитического укрепления Мешоко (V тыс. до н.э., Республика Адыгея) – профильное изменение ФА носило убывающий характер (рис. 5, объект 38). Низкая фосфатазная активность в культурном слое, вероятно, объясняется весьма древним возрастом памятника.

На территории средневекового городища Учцакар (XI–XIII вв., Удмуртская Республика) в пахотном горизонте современной почвы, сформировавшейся на материале культурного слоя памятника, ФА составляла 24.7 $\mu\text{g P}_2\text{O}_5/(\text{г ч})$ (рис. 6, объект 39). В нижележащих слоях антропогенных напластований, которые не были проработаны почвообразованием, величины данного показателя резко уменьшались, однако сохраняли стратиграфические различия. Уменьшение ФА в отдельных пластах культурного слоя так же, как в случае с поселением Мешоко, происходило на фоне повышенного содержания валового фосфора. Следует иметь в виду, что источником накопления фосфатов в культурном слое древних поселений, зачастую, является зола из печей и зола с углями от пожаров. Не исключено, что многочисленные пожары, сохранившиеся в виде ряда углистых и золистых прослоек, также могли повлиять на биологическую активность культурного слоя данного городища. Заметное увеличение ФА отмечено на глубине 117–123 см в слое, представ-

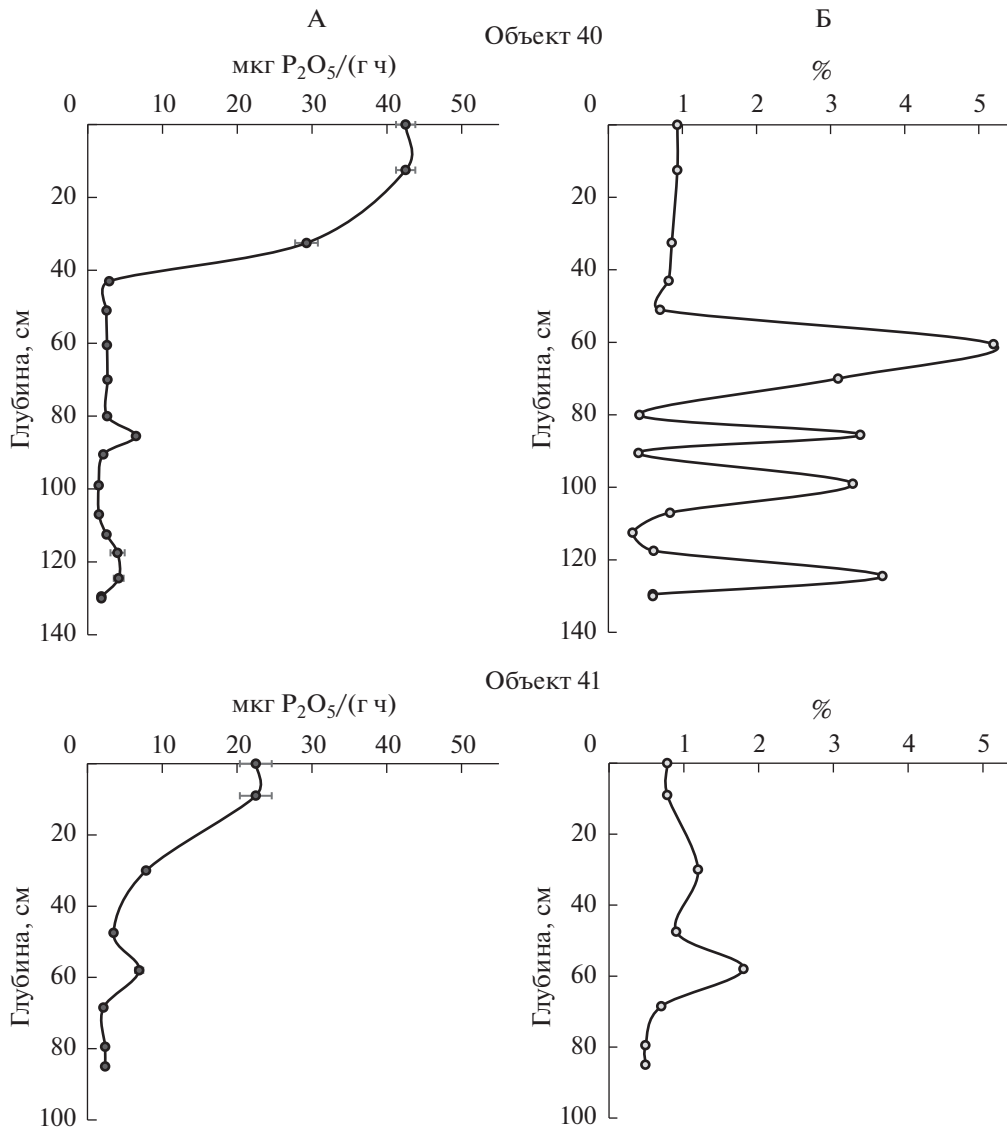


Рис. 7. Фосфатазная активность (А) и содержание валового фосфора (Б) в культурных слоях торгово-административного центра (объект 40) и жилой зоны (объект 41) Болгарского городища (1100–700 л.н.), Республика Татарстан.

ленном мощной толщей древесной коры и щепы, а также в прослойке с костяными опилками — следами косторезного художественного промысла — на глубине 99–100 см. Увеличение ФА в культурном слое может свидетельствовать о том, что его формирование сопровождалось поступлением преимущественно органических форм фосфора.

В культурном слое другого средневекового памятника (городище Болгар IX–XV вв., Республика Татарстан) профильные изменения ФА различались в зависимости от характера использования территории. Так, в районе торгово-административного центра городища отмечено 4 пика содержания фосфора: два из них приходились на слои золы и углей, а другие два, синхронные с пиками фосфатазной активности, были приурочены к сло-

ям, где выявлялись следы минерализованных субстратов органической природы (рис. 7, объект 40). Возможно, на этих этапах формирования культурного слоя в почве накапливались преимущественно органические фосфорсодержащие материалы, как и в культурном слое жилой зоны поселения (объект 41).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ряду зональных почв ФА верхнего горизонта изменялась в пределах двух порядков — от 2.8 до 287 $\mu\text{кг P}_2\text{O}_5/(\text{г ч})$. Максимальные значения ФА были зафиксированы в верхнем горизонте серых лесных почв; минимальные — в бурых полупустынных почвах бугров Бэра.

В солонцах по сравнению со светло-каштановыми почвами было отмечено более широкое варьирование ФА в верхнем горизонте; при этом средняя величина ФА в горизонте А1 в солонцах была в 1.5 раза выше, чем в светло-каштановых почвах. В горизонтах В1 и В2 в солонцах показано снижение ФА, в то время как в светло-каштановых почвах наблюдается обратная тенденция ее увеличения в иллювиальной части профиля.

При оценке ФА в образцах верхнего горизонта солонцов были выявлены максимальные значения данного показателя в поверхностном почвенном слое мощностью 2 см.

В погребенном под курганом I в. н.э. почвенном комплексе с участием светло-каштановой почвы, двух солонцов и лугово-каштановой почвы, в последней были отмечены наиболее высокие значения ФА. Здесь этот показатель достигал 70% от уровня современной фоновой почвы. В светло-каштановой почве и солонцах погребенного комплекса ФА была на 1–2 порядка ниже в горизонте А1 и в 2–20 раз ниже в горизонте В1 по сравнению с аналогичными горизонтами лугово-каштановой почвы.

В разновозрастных подкурганых палеопочвах на уровне тенденции отмечено некоторое увеличение ФА в почвах гумидных эпох по сравнению с периодами аридизации.

Исследование ФА культурных слоев древних поселений показало значительную неоднородность показателя и отсутствие явных закономерностей его варьирования. В ряде случаев отмечалось существенное увеличение ФА, синхронное с возрастанием содержания фосфатов, и связанное, как мы полагаем, с поступлением органических форм фосфора в культурный слой.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Госзадания № 0191-2019-0046 “Развитие почв в условиях меняющегося климата и антропогенных воздействий”. Исследование культурных слоев проводилось в рамках гранта РФФИ 17-29-04257.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ариунукина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 490 с.
2. *Ахмедова З.Н., Рамазанова Н.И., Гасанов Г.Н.* Фосфатазная и уреазная активность почв горных и равнинных ландшафтов Дагестана // *Вестник Дагестанского научного центра.* 2014. № 52. С. 36–39.
3. *Девятова Т.А., Румянцева И.В., Антонюк А.Н.* Влияние лесных полос на активность гидролитиче-

ских ферментов в черноземе обыкновенном Каменной Степи // *Вестник ВГУ. Сер.: Химия. Биология. Фармация.* 2013. № 1. С. 115–119.

4. *Демкин В.А., Якимов А.С., Алексеев А.О., Каширская Н.Н., Ельцов М.В.* Палеопочвы и природные условия степей Нижнего Поволжья в золотоордынское время // *Почвоведение.* 2006. № 2. С. 133–144. <https://doi.org/10.1134/S1064229306020013>
5. *Демкина Т.С., Борисов А.В., Демкин В.А., Хомутова Т.Э., Кузнецова Т.В., Ельцов М.В., Удальцов С.Н.* Палеоэкологический кризис в степях нижнего Поволжья в эпоху средней бронзы (рубеж III–II тыс. до н.э.) // *Почвоведение.* 2017. № 7. С. 799–813. <https://doi.org/10.1134/S1064229317070018>
6. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 320 с.
7. *Елешева Р.Е., Бакенова Ж.Б.* Изменение биологической активности каштановой почвы при длительном применении удобрений в плодосеменном севообороте с масличными культурами // *Почвоведение.* 2012. № 11. С. 1226–1230. <https://doi.org/10.1134/S106422931211004X>
8. *Звягинцев О.Г.* Биологическая активность почв и шкала для оценки некоторых ее показателей // *Почвоведение.* 1978. № 6. С. 48–54.
9. *Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М.* Биология почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 445 с.
10. *Зинченко М.К., Зинченко С.И.* Ферментативный потенциал агроландшафтов серой лесной почвы Владимирского Ополя // *Успехи современного естествознания.* № 1. 2015. С. 1319–1323.
11. *Каширская Н.Н., Плеханова Л.Н., Удальцов С.Н., Чернышева Е.В., Борисов А.В.* Механизмы и временной фактор ферментативной организации палеопочв // *Биофизика.* 2017. Т. 62. № 6. С. 1022–1029. <https://doi.org/10.1134/S00066350917060094>
12. *Каширская Н.Н., Чернышева Е.В., Плеханова Л.Н., Борисов А.В.* “Биологический” и минеральный фосфор в культурном слое // *Палеопочвы, палеоэкология, палеоэкономика.* Пушкино, 2017. С. 94–98.
13. *Колесников С.И., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Одабашиян М.Ю., Николаева К.Н.* Экологическая оценка воздействия антибиотика тилозина на биологические свойства чернозема обыкновенного // *Наука. Инновации. Технологии.* 2015. № 1. С. 186–202.
14. *Кононова М.М.* Органическое вещество почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 315 с.
15. *Купревич В.Ф., Щербакова Т.А.* Почвенная энзимология. Минск, 1966. 395 с.
16. *Куприенко Н.В.* Методы анализа распределений. Выборочное наблюдение. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. 138 с.
17. *Мухаметзянова А.Д., Ахметова А.И., Шарипова М.Р.* Микроорганизмы как продуценты фитаз // *Микробиология.* 2012. Т. 81. № 3. С. 267–275. <https://doi.org/10.1134/S0026261712030095>
18. *Пилецкая О.А., Прокопчук В.Ф.* Фосфатный режим и фосфатазная активность черноземовидной почвы // *Вестник КрасГАУ.* 2014. № 8. С. 47–50.
19. *Плеханова Л.Н., Ткачев В.В.* Физико-химические свойства почв многослойного поселения эпохи бронзы в окрестностях г. Гай // *Поволжская археология.* 2013. Т. 6. № 4. С. 225–234. <https://doi.org/10.24852/ra2013.4.6>
20. *Пишеничная С.И.* Фосфатный режим и фосфатазная активность почвы // *Вопросы растениеводства.* Киев, 1964. Т. 8. С. 210–219.

21. *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. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050064>
22. *Рухович Д.И., Панкова Е.И., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И.* Количественный расчет параметров выделения зон и фаций ареалов распространения каштановых почв России на основе климато-почвенно-гранулометрического показателя // Почвоведение. 2019. № 3. С. 304–316. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1901012X>
23. *Турусов В.И., Гармашов В.М., Дьячкова Т.И.* Ферментативная активность чернозема обыкновенного в различных севооборотах при разных способах обработки почвы // Агрехимия. 2012. № 9. С. 21–25.
24. *Хазиев Ф.Х.* Ферментативная активность почв. М.: Наука, 1982. 203 с.
25. *Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
26. *Хомутова Т.Э., Демкина Т.С., Каширская Н.Н., Демкин В.А.* Фосфатазная активность современных и погребенных каштановых почв Волго-Донского Междуречья // Почвоведение. 2012. № 4. С. 478–483. <https://doi.org/10.1134/S1064229312040060>
27. *Borisov A., Shishlina N.* Climate changes and soil evolution in desert steppe zone of Russian Plain during the Bronze Age // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM. SGEM 2017. Conference Proceedings. V. 17. № 32. P. 77–84. <https://doi.org/10.15688/jvolsu4.2018.3.5>
28. *Chernysheva E.V., Khomutova T.E., Borisov A.V., Korobov D.S.* Urease activity in cultural layers at archaeological sites // J. Archaeological Sci. 2015. V. 57. P. 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.01.022>
29. *Emurotu M.O., Anyanwu C.U.* Effect of atrazine and butachlor on some soil enzymes activities at different concentrations // European J. Experimental Biology. 2016. V. 2. № 6. P. 9–15.
30. *Holliday V., Gartner W.* Methods of soil P analysis in archeology // J. Archaeological Sci. 2007. V. 34/2. P. 301–333. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.05.004>
31. *Lemanowicz J., Bartkowiak A.* Changes in the activity of phosphatase and the content of phosphorus in salt-affected soils grassland habitat natura 2000 // Polish J. Soil Science. 2016. V. XLIX/2. P. 149–165. <https://doi.org/10.17951/pjss/2016.49.2.149>
32. *Margalef O., Sardans J., Fernández-Martínez M., Molowny-Horas R., Janssens I.A., Ciais P., Goll D., Richter A., Obersteiner M., Asensio D., Peñuelas J.* Global patterns of phosphatase activity in natural soils // Scientific Reports. 2017. V. 7. P. 1337. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01418-8>
33. *Khomutova T., Kashirskaya N., Demkina T., Kuznetsova T., Fornasier F., Shishlina N., Borisov A.* Precipitation pattern during warm and cold periods in the Bronze Age (around 4.5–3.8 ka BP) in the desert steppes of Russia: Soil-microbiological approach for palaeoenvironmental reconstruction // Quarter. Int. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.02.013>
34. *Nannipieri P., Giagnoni L., Landi L., Renella G.* Role of phosphatase enzymes in soil // Phosphorus in action. Soil Biology. 2011. V. 26. P. 215–243. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_9
35. *Oliveira Silva A.E., De Medeiros E.V., Dos Santos Borges Inácio E., Salcedo I.H., De Amorim L.B.* Soil enzymatic activities in areas with stages and management of forest regeneration from caatinga // Rev. Caatinga, Mossoró. 2018. V. 31/2. P. 405–414.
36. *Skujins J.J.* Extracellular enzymes in soil // Crit. Rev. Microbiol. 1976. V. 4/4. P. 383–421.
37. *Speir T.W., Ross D.J.* Soil phosphatase and sulphatase // Soil enzymes. Ed. Burns R.G. Academic: London, 1978. P. 197–250.
38. *Utobo E.B., Tewari L.* Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status // Appl. Ecol. Environ. Res. 2015. V. 13/1. 147–169. https://doi.org/10.15666/aeer/1301_147169

Chronogeographical Features of Phosphatase Activity in Natural and Human-Transformed Soils

N. N. Kashirskaya¹*, L. N. Plekhanova¹, E. V. Chernisheva¹, M. V. Eltsov¹,
S. N. Udaltsov¹, and A. V. Borisov¹

¹*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia*

*e-mail: nkashirskaya81@gmail.com

Data on phosphatase activity (FA) in soils of different natural zones, intrazonal soils, different-time buried soils and cultural layers of archaeological monuments were summarized. FA variability in soil complexes was analyzed. The maximum values of FA were detected in the upper horizon of Eutric Retisols, and its minimum values – in Haplic Calcisols of the Baer hills. In Solonetz, a wider variation of FA in the A1 horizon was recorded as compared to Cambisols and Calcicols. Mean value of FA in the upper horizon of Solonetz was 1.5 times higher than in the upper horizons of Cambisols and Calcicols. The maximum values of FA in the profile of Solonetz were recorded in the upper 2-cm layer. Compared to A1 horizon, an increase of FA content in the B1 horizon of Cambisols and Calcicols and its decrease in the B1 horizon of Solonetz were shown. In sub-kurgan paleosols of different time of burial, an increased level of FA was noted for paleosols buried in the humid epochs than in those buried in arid epochs. Cultural layers of ancient settlements are characterized by maximum variability of FA values. In some cases, if the cultural layers were characterized by low organic matter content, the values of FA correlated with the content of phosphates. In the cultural layers with ash and charcoals, the low values of FA were recorded at high phosphate content.

Keywords: enzymatic activity, phosphatase, buried soils, cultural layers, archaeological monuments