ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2024, № 1, с. 127–141

ПАЛЕОПОЧВОВЕДЕНИЕ

УДК 631.46:631.48:930.26

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВАРЬИРОВАНИЕ МИКРОБНОЙ БИОМАССЫ В СОВРЕМЕННЫХ И ПОГРЕБЕННЫХ ПОЧВАХ СТЕПНОЙ ЗОНЫ

© 2024 г. Т. Э. Хомутова[a], Е. В. Чернышева[a], *, Н. Н. Каширская[a], К. С. Дущанова[a], А. А. Петросян[a], М. В. Ельцов[a], А. В. Борисов[a]

[a]*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ул. Институтская, 2, Пущино, 142290 Россия*

**e-mail: e.chernyysheva@yandex.ru*

Поступила в редакцию 13.06.2023 г.
После доработки 09.09.2023 г.
Принята к публикации 10.09.2023 г.

Проведено обобщение всех полученных авторским коллективом к настоящему времени результатов исследований микробной биомассы в погребенных почвах археологических памятников и современных фоновых почвах. В географическом плане объекты исследования охватывают юго-восток Русской равнины, Прикаспийскую низменность, Западный Кавказ и Крым. Накоплен представительный объем данных о хроно-географических закономерностях изменений микробной биомассы в черноземах (Chernozem mollic), каштановых почвах (Kastanozems Haplic), светло-каштановых почвах (Cambisols salic) и солонцах (Solonetz Humic). Хронологические рамки: эпоха энеолита–Новое время (5700–300 лет назад). Биомассу почвенных микробных сообществ оценивали по содержанию фосфолипидов в почве. Показано, что микробная биомасса в погребенных почвах не определяется типом почвы и временем пребывания почвы в погребенном состоянии. Среднее значение содержания фосфолипидов в погребенных почвах в 2 раза ниже, чем в современных, но корреляции микробной биомассы со временем пребывания почвы в погребенном состояние не выявлено. В большей степени содержание фосфолипидов в погребенных почвах зависело от содержания ила, при содержании которого <10% значения микробной биомассы были минимальными. Геоморфологическая позиция – значимый фактор, влияющий на величину микробной биомассы. Максимальные значения микробной биомассы характерны для почв локальных водоразделов и склонов северной экспозиции. В солонцах отмечена обратная корреляция микробной биомассы и мощности горизонта SEL. В культурных слоях древних поселений микробная биомасса превышает значения современных почв и зависит от особенностей хозяйственного использования территории и объемов поступающих субстратов антропогенной природы.

Ключевые слова: микробные сообщества, фосфолипиды, сухая степь, археологическое почвоведение
DOI: 10.31857/S0032180X24010108, **EDN:** ZLADNT

ВВЕДЕНИЕ

В России в последние годы активно развивается исследование палеопочв археологических памятников [1–9, 14, 18, 19, 25, 26, 32, 37, 41, 45]. В первую очередь это касается степной зоны, где в огромном количестве встречаются курганы разных эпох. Традиция насыпать почвенно-грунтовый холм над погребением возникла у степных племен более 6000 л.н. в эпоху энеолита, сохранялась у населения эпохи бронзы (2-я половина IV–II тыс. до н.э.), раннежелезного века (I тыс. до н.э. – IV в.н.э.), и средневековья (V–начало XV вв.н.э.). Существующие археологические и радиоуглеродный методы датировки позволяют определить время сооружения того или иного памятника с точностью в несколько десятков лет. Это обеспечивает получение детального экспериментального материала для реконструкции истории развития почв и природной среды.

На основе изучения подкурганных педохронорядов установлены основные закономерности развития почв сухих и пустынных степей дренированных ландшафтов юго-востока Русской равнины в эпохи позднего энеолита и бронзы (6000–3000 л.н.) [41].

Известно, что палеопочвы являются естественными хранилищами биоразнообразия, где

микроорганизмы могут сохраняться в жизнеспособном состоянии в течение десятков тысяч лет [15]. Исследования микробиологической компоненты погребенных почв начались более 20 лет назад [10–13, 42]. Тогда впервые было показано, что в подкурганных погребенных почвах до настоящего времени сохраняются микробные сообщества, существовавшие во время сооружения археологических памятников, что подтверждено данными определения возраста микробной фракции с использованием метода ^{14}C атомной масс-спектрометрии [42].

Рядом исследователей начато изучение почвенной микробной ДНК, определяется таксономическая структура микробных сообществ разновозрастных плейстоценовых и голоценовых палеопочв [33, 34, 49, 51]. Показано, что микробные сообщества в палеопочвах разного типа и возраста соответствуют условиям своего формирования, что дает основание использовать их в качестве стратиграфических маркеров и индикаторов палеоклиматических условий [27].

К настоящему времени проведены палеопочвенно-микробиологические исследования более 100 археологических памятников (курганов и поселений) эпох энеолита, бронзы, раннего железного века и средневековья в пределах лесостепной, степной, полупустынной зон центра и юго-востока Русской равнины, Прикаспийской низменности, Западного Кавказа и Крымского полуострова. В связи с высоким содержанием карбонатов в большинстве изученных почв оценку биомассы почвенных микробных сообществ проводили по содержанию фосфолипидов, которые являются обязательным компонентом клеточных мембран живых микроорганизмов [30, 44]. Доказательством того, что эти соединения относятся только к живым микробным клеткам, является их высокая скорость разложения в почве [56, 57]. Предполагается, что большая часть интактных полярных липидов в органическом веществе почвы (45–80%) принадлежит бактериальному сообществу [43].

К настоящему времени накоплен весьма представительный объем данных о хроно-географических закономерностях изменения микробной биомассы в черноземах (Chernozem mollic), каштановых почв (Kastanozems Haplic), светло-каштановых почв (Cambisols salic) и солонцов (Solonetz Humic).

Сложность оценок микробной биомассы связана с ее значительными колебаниями в зависимости от сезона [38]. Однако в пространственном распределении почвенной микробной биомассы в пределах земного шара прослеживаются определенные закономерности. Глобальное распределение микробной биомассы соответствует распределению содержания углерода и азота в почве [54].

Большое влияние на содержание микробной биомассы, входящей в состав углеродного пула почвы, оказывает содержание илистых и глинистых частиц [40, 52, 53]. Показано, что величина микробной биомассы в большей степени зависит от гранулометрического состава почвы и содержания органического углерода, тогда как на микробное дыхание почв наибольшее влияние оказывает реакция почвенной среды и обеспеченность питательными элементами [20]. Было установлено значительное отрицательное влияние засоленности почвы на содержание углерода микробной биомассы, выраженное в отрицательной экспоненциальной зависимости между этими показателями [55]. Исследования влияния реакции среды почв на микробную биомассу выявили наибольшие ее величины при значениях pH выше 7. Отмечены статистически значимые взаимосвязи между pH почвы и микробной биомассой [50]. Показана достоверная связь изменений температуры и влажности с содержанием углерода микробной биомассы в почвах. Влияние влажности проявлялось через изменение активности растений и обеспеченности микроорганизмов биогенными элементами [31].

Как правило, такой показатель, как микробная биомасса использовался в качестве дополнительного инструмента для реконструкции природных условий прошлого. Выявлено, что значительная биомасса микроорганизмов и их высокая доля в органическом углероде почвы дают основания говорить о возрастающем поступлении в почву растительной массы [11]. Известно, что в засушливых областях, к каковой относится большая часть рассматриваемого региона, увеличение растительной массы, прежде всего, обусловлено увеличением количества атмосферных осадков. Усиление аридизации климата приводит к угнетению фитоценозов, сокращению поступления в почву растительных остатков и снижению микробной биомассы и ее доли в органическом углероде почвы.

Настоящая статья представляет собой обзор авторских публикаций и посвящена обобщению всех полученных к настоящему времени результатов изучения микробной биомассы погребенных почв и масштабов ее варьирования в зависимости от физико-химических свойств почв, ландшафтно-геоморфологических условий и антропогенной деятельности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Представлены результаты исследования серии погребенных почв археологических памятников (курганов и поселений), расположенных в различных природных областях (рис. 1). Объекты настоящей работы подобраны таким образом, чтобы охватить широкое разнообразие

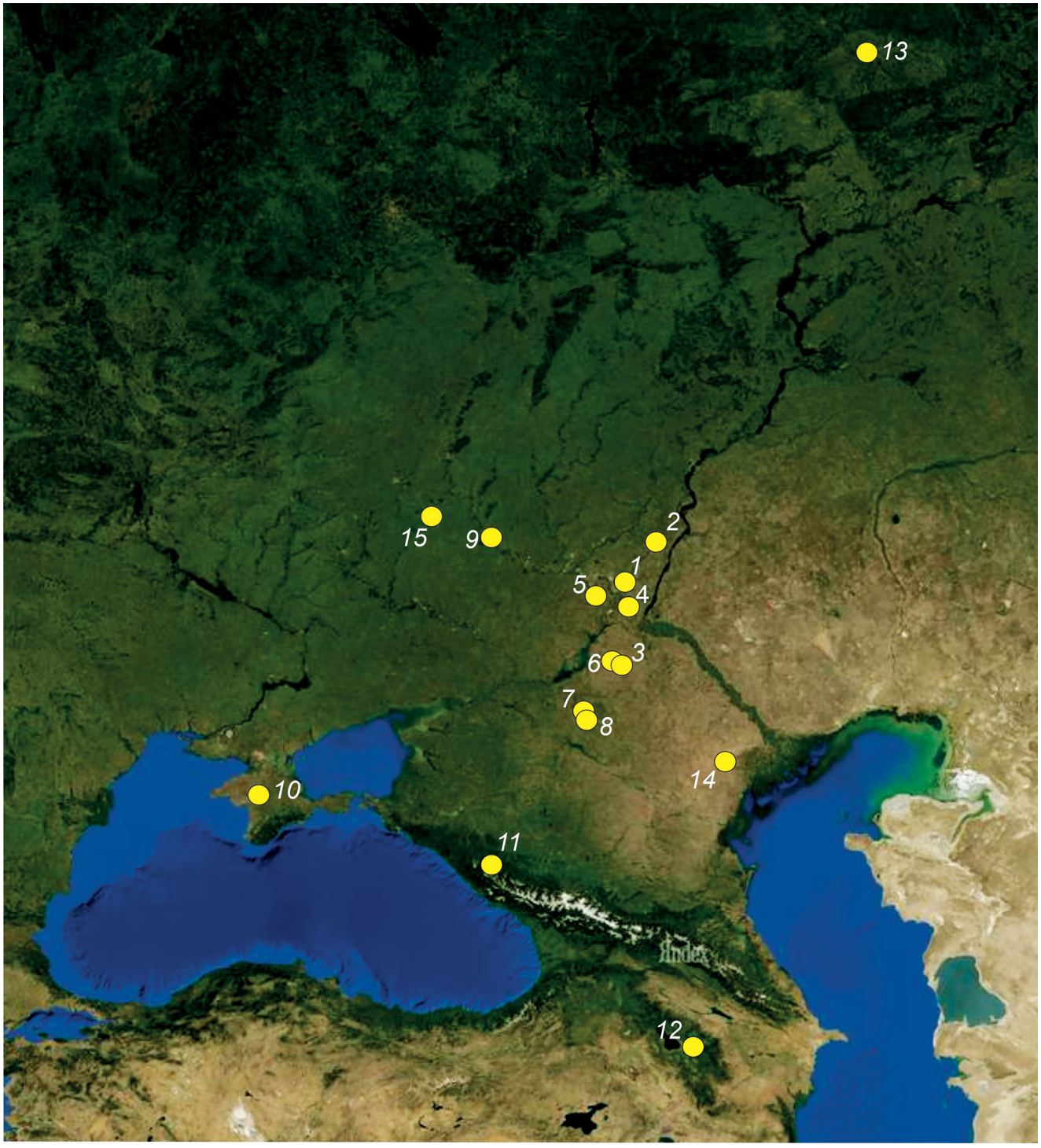


Рис. 1. Расположение объектов исследования: *1* – курганный могильник Авиловский, *2* – курганный могильник Саломатино, *3* – курганный могильник Аксай, *4* – Царицинская оборонительная линия (Вал Анны Иоановны), *5* – курганный могильник Перекопка, *6* – курганный могильник Перегрузное, *7* – курганный могильник Песчаный, *8* – курганный могильник Темрта, *9* – курганный могильник Филоновский, *10* – курганный могильник Мазанка, *11* – поселение Мешоко, *12* – поселение Сотк, *13* – поселение Учкакар, *14* – ключевой участок Бугры Бэра, *15* – ключевой участок Ямская степь.

природно-климатический условий, не выходя за рамки степной зоны[1]. Полученные данные по микробной биомассе погребенных почв было необходимо сравнить с аналогичными для современных почв. Для этого в пределах указанных объектов проводили исследования фоновых почв, расположенных в однотипных геоморфологических и литологических позициях. Свойства почв ключевых участков, представленных в настоящей работе, опубликованы ранее, поэтому ограничимся краткой информацией о них.

1. Курганный могильник Авиловский. Курганы ямной культуры (5200 л.н.), катакомбной культуры (4800 л.н.), среднесарматской культуры (1900 л.н.) и Средневековья (700–750 л.н.). Координаты: 47.981728 N, 44.049085 E. Волгоградская область, Котовский район. Среднегодовое количество осадков 400 мм. Настоящие степи. Каштановые почвы [23, 46].

2. Курганный могильник Соломатино. Курганы срубной культуры (3500–3700 л.н.), сарматской культуры (1800 л.н.) и Средневековья (700–750 л.н.). Координаты: 50.018005 N, 44.851149 E. Волгоградская область, Камышинский район. Среднегодовое количество осадков 400 мм. Настоящие степи. Каштановые почвы [9].

3. Курганный могильник Аксай. Курганы катакомбной культуры (4300–4500 л.н.) и сарматской культуры (1900 л.н.). Координаты: 50.018005 N, 44.851149 E. Волгоградская область. Октябрьский район. Среднегодовое количество осадков 400 мм. Настоящие степи. Каштановые почвы [21].

4. Царицынская оборонительная линия (Вал Анны Иоанновны). Вал заложен в 1718 г. Координаты: 49.016764 N, 44.232292 E. Волгоградская область, Городищенский район. Среднегодовое количество осадков 400 мм. Настоящие степи. Каштановые почвы [13].

5. Курганный могильник Перекопка. Курганы катакомбной культуры (4700–4600 л.н. и срубной культуры (3700–3500 л.н.). Координаты: 47.981728 N, 44.049085 E; 49.406392 N, 43.339383 E. Волгоградская область, Клетский район. Среднегодовое количество осадков 350–400 мм. Настоящие степи. Каштановые почвы [10].

6. Курганный могильник Перегрузное. Курганы среднесарматской культуры (1900 л.н.). Координаты: 47.899772 N, 43.988956 E. Волгоградская область, Октябрьский район. Среднегодовое количество осадков 350 мм. Пустынные степи. Каштановые почвы [24, 47].

7. Курганный могильник Темрта. Курганы катакомбной культура. 4600–4800 л.н. Координаты: 46.457935 N, 43.374516 E. Ростовская область, Ремонтненский район. Пустынная степь. Среднегодовое количество осадков 350 мм. Каштановые почвы [29, 48].

8. Курганный могильник Песчаный. Курганы эпохи энеолита (5200–5400 л.н.), катакомбной культуры (4600–4800 л.н.), Средневековья (700–750 л.н.). Координаты: 46.560470 N, 43.657674 E. Ростовская область, Ремонтненский район. Пустынная степь. Среднегодовое количество осадков 350 мм. Каштановые почв [10].

9. Курганный могильник Филоновский. Курган лолинской культуры. 4200–4000 л.н. Координаты: 45.003914 N, 34.255349 E; 49.935512 N, 40.559088 E. Воронежская область, Богучарский район. Разнотравная степь. Среднегодовое количество осадков 500 мм. Черноземы сегрегационные [3].

10. Курганный могильник Мазанка. Курганы катакомбной культуры 4600–4800 л.н. Координаты: 45.003914 N, 34.255349 E. Республика Крым, Симферопольский район. Ковыльная степь. Среднегодовое количество осадков 400 мм. Темногумусовые почвы.

11. Поселение Мешоко. 5700–5500 л.н. Майкопская культура. Координаты: 44.296028 N, 40.183475 E. Республика Адыгея, Майкопский район. Широколиственные леса. Среднегодовое количество осадков 750 мм. Темногумусовые почвы [36].

12. Поселение Сотк-2. 5200 4500–3000 л.н. Куро-аракская культура. Координаты: 40.200646 N, 45.866029 E. Республика Армения, Гехаркуникская область. Субальпийские луга. Среднегодовое количество осадков 450 мм. Темногумусовые почвы [39].

13. Поселение Учкакар. 700–900 л.н. Чепецкая культура. Координаты 58.245812 N, 52.105565 E. Удмуртская Республика, Ярский район. Подзона южной тайги. Среднегодовое количество осадков 650 мм. Темногумусовые почвы [17].

14. Бугры Бэра. Астраханская область, Наримановский район. Координаты: 46.334755 N, 47.728955 E. Пустынные степи. Среднегодовое количество осадков 250 мм. Бурые полупустынные почвы [22].

15. Заповедник Ямская степь. Белгородская область. Координаты: 51.189339 N, 37.615950 E. Настоящие степи. Среднегодовое количество осадков 570 мм. Черноземы мицелярно-миграционные [16].

Для заложения почвенных разрезов выбирали наиболее репрезентативные участки. На выбранных участках выполнено морфолого-генетическое описание профилей почв, отобраны образцы. На микробиологические анализы образцы отбирали с соблюдением условий асептики.

[1] Единственный ключевой участок, включенный в выборку и расположенный за пределами степной зоны, это поселение Учкакар. Включение этого памятника в рассмотрение было обусловлено тем, что в настоящий момент в почвенном покрове этого участка преобладают темногумусовые почвы под разнотравно-злаковой растительностью.

Содержание органического углерода ($C_{орг}$) определяли в воздушно-сухой почве методом мокрого сжигания по Тюрину, pH водной вытяжки потенциометрическим методом, гранулометрический состав – пипеточным методом [28]. Физические и химические свойства определяли в воздушно-сухой почве. Химические анализы выполняли в ЦКП ИФХиБПП РАН.

Микробную биомассу оценивали по содержанию фосфолипидов (**ФЛ**) в мембранах почвенных микроорганизмов [30, 44]. Метод основан на экстракции почвенного образца в однофазной смеси, затем осаждении почвенного осадка центрифугированием и расслаивании супернатантов на верхний водный слой, содержащий буферный раствор, который удаляли, и нижний органический слой, содержащий липиды, в том числе фосфолипиды, который в дальнейшем анализировали колориметрически. В связи с различиями в величинах пересчетных коэффициентов для почв различных природных зон, в статье представлены результаты определения содержания фосфолипидов микробных клеток в нмоль ФЛ/г почвы без пересчета в углерод микробной биомассы. Содержание фосфолипидов определялось в образцах почв, которые до момента определения хранили в закрытых полиэтиленовых пакетах при температуре, близкой таковой момента отбора.

Всего проведено исследование 182 образцов погребенных и современных почв, а также культурных слоев разновозрастных археологических памятников. В статье показаны результаты исследования горизонта A1 или верхнего слоя 0–10 см.

Статистическую обработку полученных данных проводили в программах PC-Ord 5 и Past 4.03. В качестве основного метода ординаций использовали анализ главных компонент (PCA) или анализ избыточности (RA) там, где нельзя было применить первый метод ввиду неоднородности выборки [35].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные по содержанию фосфолипидов и основные физико-химические свойства изученных почв представлены в табл. S1 и S2.

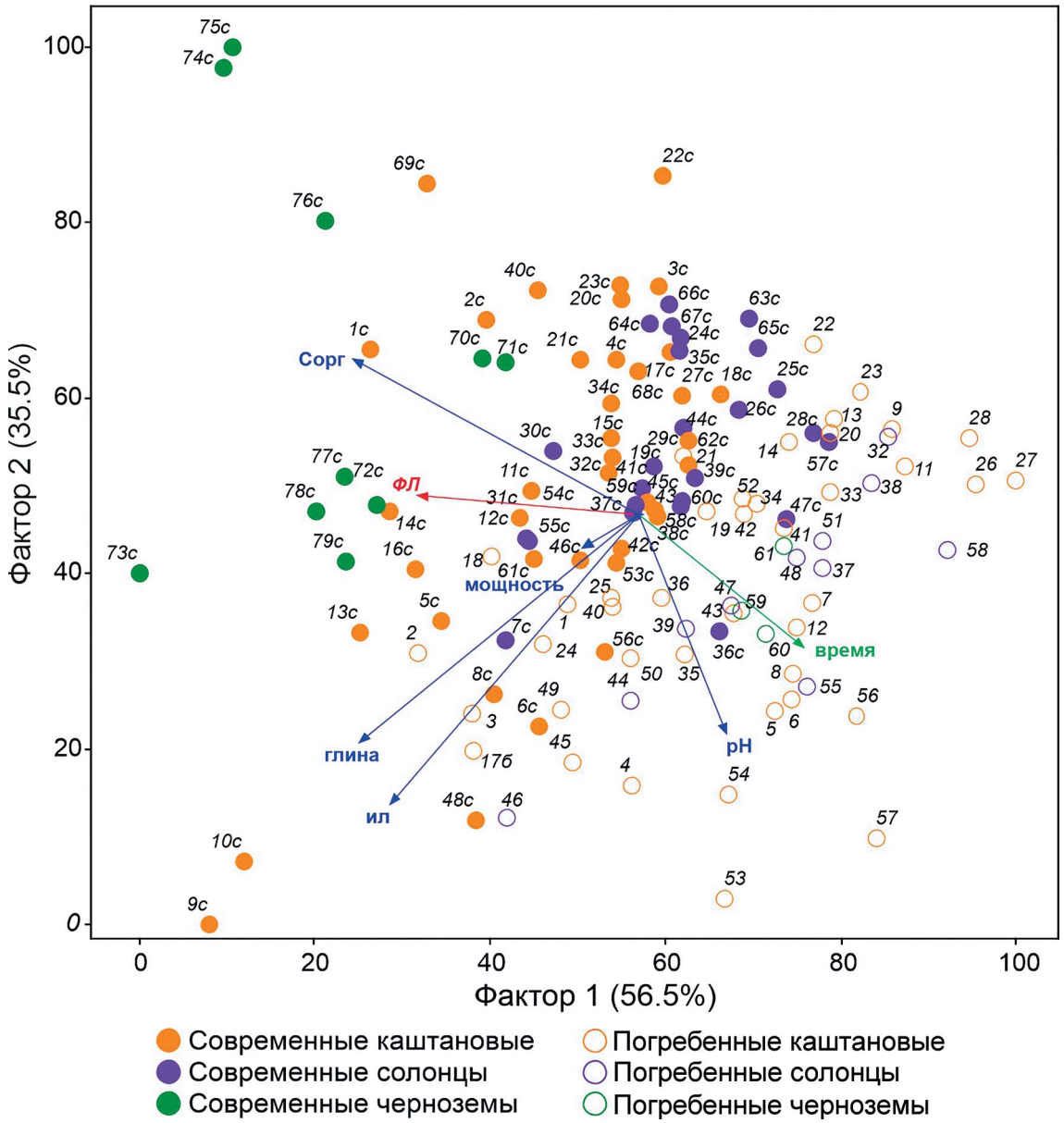
На рис. 2 методом главных компонент обобщены все полученные данные по содержанию фосфолипидов и почвенным характеристикам погребенных и современных почв.

Фактор времени и содержание органического углерода ожидаемо внесли важнейший вклад в распределение данных микробной биомассы в факторной плоскости. При этом современные почвы и погребенные почвы сформировали две обособленные группы. Однако абсолютного разделения не наблюдается и в ряде случаев в погребенных почвах микробная биомасса превышает значения современных почв. Наибольшим содержанием фосфолипидов характеризуются современные каштановые почвы ключевого участка Авиловский и черноземы мицелярно-миграционые заповедника Ямская степь (74с–76с). При этом пахотные мицелярно-миграционые черноземы (77с–79с) и агрочерноземы сегрегационные (72с) характеризуются несколько меньшим содержанием фосфолипидов. Их наименьшее содержание было выявлено в верхнем горизонте насыпи кургана сарматского времени (точка 36с).

Столь значительный вклад фактора времени не позволяет корректно анализировать весь массив данных, поэтому необходима отдельно рассматривать погребенные и современные почвы. В данном случае распределение данных будет ближе к нормальному, что позволит лучше увидеть закономерности изменений этих показателей во времени (рис. 3).

При анализе распределения значений микробной биомассы современных почв (рис. 3а) очевиден вклад типа почвы, который определяется содержанием органического углерода и количеством

Рис. 2. Метод главных компонент для химических и микробиологических параметров исследованных почв. Условные обозначения: Погребенные почвы: Курганный могильник Авиловский: *1* – разрез Д-504, *2* – разрез Д-509, *3* – разрез Д-503, *4* – разрез Д-510, *5* – разрез Д-534, *6* – разрез Д-538. Курганный могильник Саламатино: *7* – разрез Д-653, *8* – разрез Д-652, *9* – разрез Д-654, *10* – разрез Д-653. Курганный могильник Аксай: *11* – разрез Д-670, 11а – разрез Д-679, *12* – разрез Д-674, *13* – разрез Д-680, *14* – разрез Д-682, *15* – разрез Д-681, *16* – разрез Д-838, *17* – разрез Д-841, *17*б – разрез Д-683. Вал Анны Иоанновны, *18* – разрез Д-641; *19* – разрез Д-695; *20* – разрез Д-700; *21* – разрез Д-718; *22* – разрез Д-719; *23* – разрез Д-673; *24* – разрез Д-736; *25* – разрез Д-750. Курганный могильник Перекопка: *26* – разрез Е-28; *27* – разрез Б-131; *28* – разрез Е-30; *29* – разрез Д-729. Курганный могильник Перегрузное-2009: *30* – разрез Д-730; *31* – разрез Д-732; *32* – разрез Д-760; *33* – разрез Д-753; *34* – разрез Д-754; *35* – разрез Д-755; *36* – разрез Д-759. Курганный могильник Перегрузное-2011: *37* – разрез Д-775; *38* – разрез Д-776; *39* – разрез Д-777; *40* – разрез Д-778; *41* – разрез Д-779; *42* – разрез Д-780; *43* – разрез Д-781. Курганный могильник Перегрузное-2012: *44* – разрез Д-789; *45* – разрез Д-790; *46* – разрез Д-791; *47* – разрез Д-792; *48* – разрез Д-793; *49* – разрез Д-794; *50* – разрез Д-795; *51* – разрез Д-796. Курганный могильник Перегрузное-2013: *52* – разрез Д-829. Курганный могильник Темрта: *53* – разрез Б-106; *54* – разрез Б-104-к; *55* – разрез Б-104-с. Курганный могильник Песчаный; *56* – разрез Б-329; *57* – разрез Б-368; *58* – разрез Б-331. Курганный могильник Мазанка: *59* – курган 6; *60* – курган 7. Курганный могильник Филоновский: 61 –курган 1.
Современные почвы: Ключевой участок Авиловский: *1с* – разрез Д-533; *2с* – разрез Д-505. Ключевой участок Саламатино: *3с* – разрез Д-648; *4с* – разрез Д-651. Ключевой участок Аксай: *5с* – разрез Д-671; *6с* – разрез Д-676;



7c – разрез Д-676; *8c* – разрез Д-678; *9c* – разрез Д-835; *10c* – разрез Д-837. Ключевой участок Темрта: *11c* – разрез Б-105К; *12c* – разрез Б-105К. Ключевой участок Вал Анны Иоанновны: *13c* – разрез Д-640; *14c* – разрез Д-643; *15c* – разрез Д-694; *16c* – разрез Д-699; *17c* – разрез Д-715; *18c* – разрез Д-720; *19c* – разрез Д-734; *20c* – разрез Д-735; *21c* – разрез Д-749. Ключевой участок Перекопка: *22c* – разрез Е-29. Ключевой участок Перегрузное-2010: *23c* – разрез Д-727; *24c* – разрез Д-727; *25c* – разрез Д-757; *26c* – разрез Д-761; *27c* – разрез Д-756; *28c* – разрез Д-840. Ключевой участок Перегрузное-2011: *29c* – разрез Д-767; *30c* – разрез Д-768; *31c* – разрез Д-769; *32c* – разрез Д-770; *33c* – разрез Д-771; *34c* – разрез Д-772; *35c* – разрез Д-773; *36c* – разрез Д-774. Ключевой участок Перегрузное-2012: *37c* – разрез Д-783; *38c* – разрез Д-784; *39c* – разрез Д-785; *40c* – разрез Д-786; *41c* – разрез Д-787. Ключевой участок Перегрузное-2013: *42c* – разрез Д-812; *43c* – разрез Д-813; *44c* – разрез Д-815; *45c* – разрез Д-816; *46c* – разрез Д-817; *47c* – разрез Д-818; *48c* – разрез Д-819. Бугры Бэра: *49c* – разрез Д-812; *50c* – разрез Д-813; *51c* – разрез Д-815; *52c* – разрез Д-816. Ключевой участок Песчаный: *53c* – разрез Б-327. Ключевой участок Темрта: *54c* – разрез Б-105к; *55c* – разрез Б-105с. Ключевой участок Валуевка: *56c* – разрез 1; *57c* – разрез 21; *58c* – разрез 61; *59c* – разрез 81; *60c* – разрез 121; *61c* – разрез 142. Ключевой участок Большое Ремонтное: *62c* – разрез К-200; *63c* – разрез С-200; *64c* – разрез С-800–1; *65c* – разрез С-800–2; *66c* – разрез с-800–3; *67c* – разрез С-800–4; *68c* – разрез К-800; *69c* – разрез “Блюдце”. Ключевой участок Денисовка: *70c* – разрез 1; *71c* – разрез 2. Ключевой участок Филоновский: *72c* – разрез 1. Ключевой участок Мешоко: *73c* – разрез 1. Ключевой участок Ямская степь, катена целинных черноземов: *74c* – разрез Чв (водораздел); *75c* – разрез Чт (транзитная зона); *76c* – разрез Ча (аккумулятивная зона); катена агрочерноземов: *77c* – разрез АЧ (водораздел); *78c* – разрез АЧ (транзитная зона); *79c* – разрез АЧ (аккумулятивная зона).

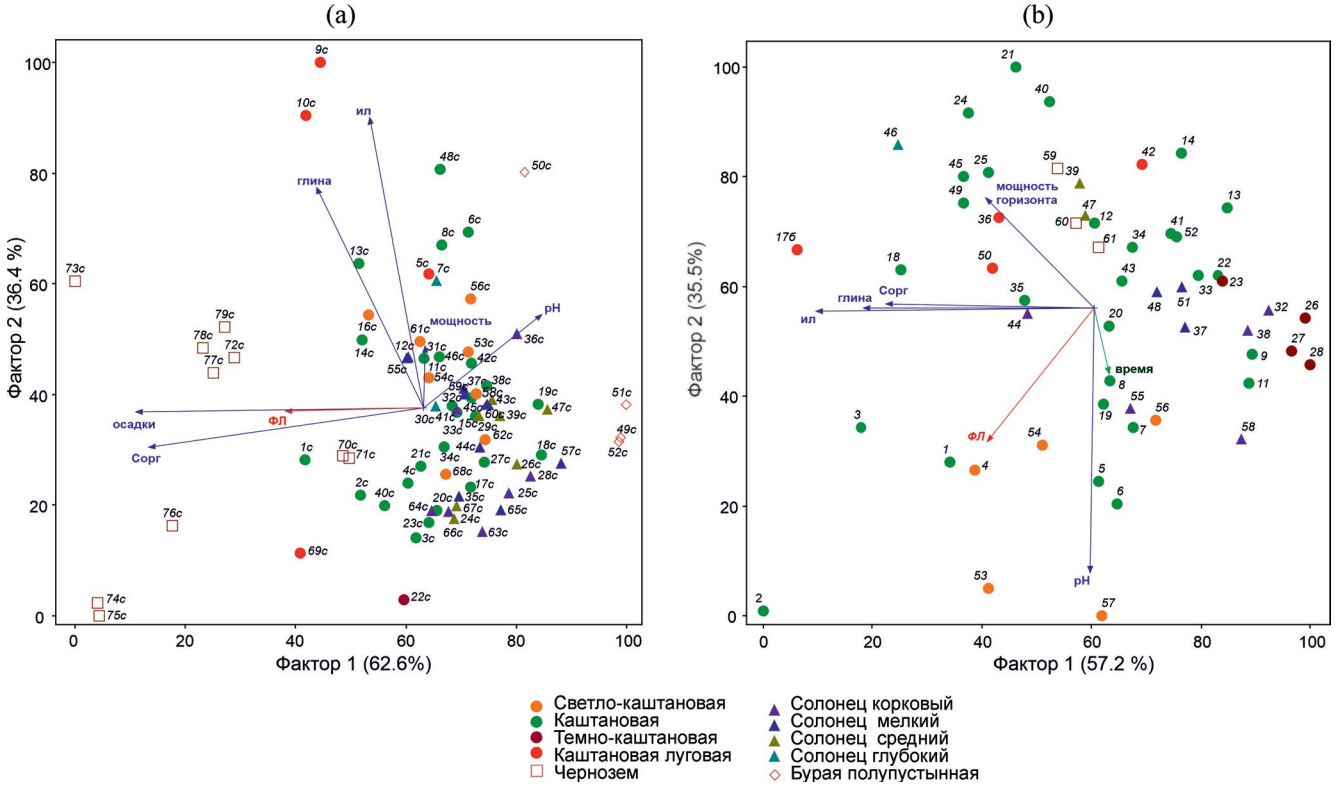


Рис. 3. Метод главных компонент для химических и микробиологических параметров в современных (a) и погребенных почвах (b). Условные обозначения см. рис. 2.

осадков. По этому фактору почвы образуют ряд от черноземов до бурых полупустынных. Внутри этого ряда важный вклад в разделение почв вносит содержание ила и физической глины: крайние значения – точки 9 и 10 – каштановые почвы на старичном аллювии в пойме реки Аксай, а также точка 33 – почвы на входах делювия известняков. По этому принципу верхние горизонты солонцов образуют компактную группу в нижней правой области диаграммы. На уровне тенденции можно говорить о сегрегации корковых/мелких солонцов и солонцов средних/глубоких. Детальный анализ закономерностей изменения микробной биомассы в современных почвах требует отдельного внимательного изучения и не входил в задачи данной работы. Поэтому далее рассмотрены преимущественно погребенные почвы и выявлены факторы, определяющие содержание в них фосфолипидов.

Фактор типа почвы. В отличие от современных почв, фактор типа почвы, определяемый по количеству осадков и содержанию $C_{орг}$, не играет значимой роли в распределении микробной биомассы погребенных почв (рис. 3b). Так, микробная биомасса чернозема сегрегационного (Воронежская область, точка 61) и темногумусовых почв предгорной зоны Крымского полуострова (точки 59, 60) заметно ниже, чем в погребенных каштановых почвах курганного могильника Авиловский (Волгоградская область) и меньше, чем в светло-каштановых почвах могильника Темрта (Ростовская область), точки 1–6 и 53–54 соответственно. Минимальные значения микробной биомассы были характерны для погребенных каштановых почв (точки 24, 25, 40–43) и солонцов (точки 39, 47, 48) курганов сарматского времени в пределах могильника Перегрузное.

Фактор времени. Рассмотрено влияние фактора времени на величину микробной биомассы в погребенных почвах (рис. 4). Обращает на себя внимание точка 2 – погребенная каштановая почва кургана сарматской культуры могильника Авиловский. Содержание фосфолипидов в ней находится на уровне современных значений. Полагаем, что причиной этого может быть малая мощность курганной насыпи (26 см), в результате погребенная почва функционировала в режиме нижней части гумусового горизонта современной почвы. Поэтому данная точка не рассматривается. Во всех других случаях высота насыпи превышала 50 см, что обеспечивает хорошие условия для консервации почвенных свойств.

Точки 1 и 3 (погребенная почва сарматского времени и средневековья), где наблюдали наиболее

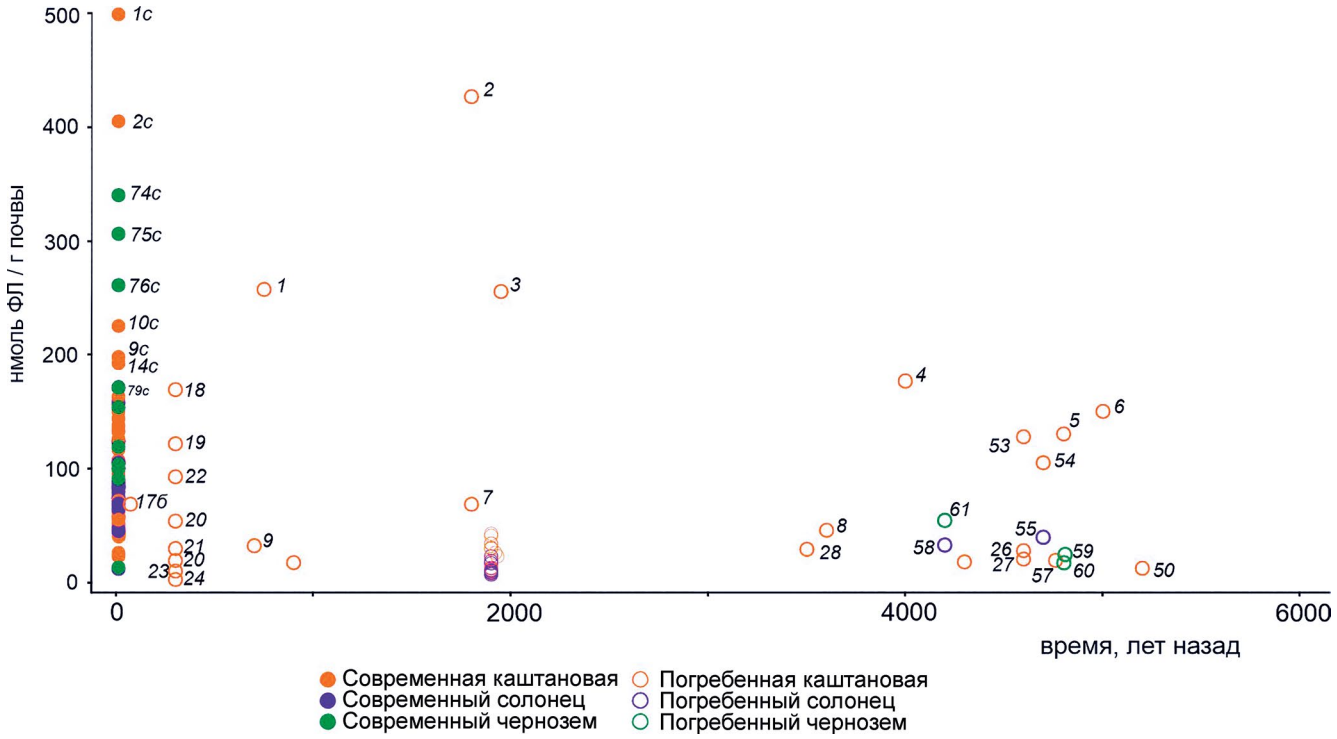


Рис. 4. Изменения микробной биомассы в погребенных почвах в зависимости от длительности пребывания в погребенном состоянии Условные обозначения см. рис. 2.

высокие значения микробной биомассы, также относятся к курганному могильнику Авиловский. Следует отметить, что на данном ключевом участке и для современных почв отмечены наиболее высокие значения микробной биомассы. Возможно, это связано со спецификой физико-химических свойств данного ключевого участка, которые рассмотрены ниже.

Оставшийся массив данных демонстрирует практически полное отсутствие взаимосвязей между микробной биомассой почв и временем пребывания почвы в погребенном состоянии. При этом большая часть выборки каштановых почв Нового времени (точки 18–24, ключевой участок Вал Анны Иоанновны, 300 л.н.), практически все почвы средневековья и сарматского времени (700 и 2000–2100 л.н.), а также большая часть погребенных черноземов, каштановых почв и солонцов эпохи бронзы характеризуются одинаковыми значениями микробной биомассы. При этом в некоторых почвах, находящихся в погребенном состоянии более 4000 лет, сохраняется микробная биомасса на уровне современных почв. Вероятно, в данном случае можно констатировать, что те условия, в которых находилось микробное сообщество погребенных почв с момента погребения до настоящего времени лишь в редких случаях способствовали сохранению живых микробных клеток.

Фактор гранулометрического состава. На рис. 3 хорошо видно, что внутри массива данных имеются выраженные закономерности распределения почв по содержанию ила и физической глины, что требует более внимательного рассмотрения этого вопроса.

На рис. 5 представлены пределы варьирования значений микробной биомассы в погребенных и современных почвах в зависимости от гранулометрического состава почв.

Перед тем, как перейти к рассмотрению этого вопроса следует отметить, что в выборку современных почв были включены два разреза пойменных почв с содержанием физической глины на уровне 69–76%, что нашло отражение на рисунке. В выборке погребенных почв таких объектов нет. При этом средние значения содержания ила и глины в погребенных ($n = 61$) и современных почвах ($n = 79$) были очень близки 12.7 и 29.9% и 13.5 и 29.6% соответственно, что позволяет проводить сравнения.

Очевидно, что в погребенных почвах имеет место тесная корреляция между содержанием мелких фракций и микробной биомассой. Так, при содержании ила <10% и физической глины <25% содержание фосфолипидов не превышает 20–25 нмоль ФЛ/г почвы. Резкое возрастание микробной биомассы наблюдается в почвах более тяжелого

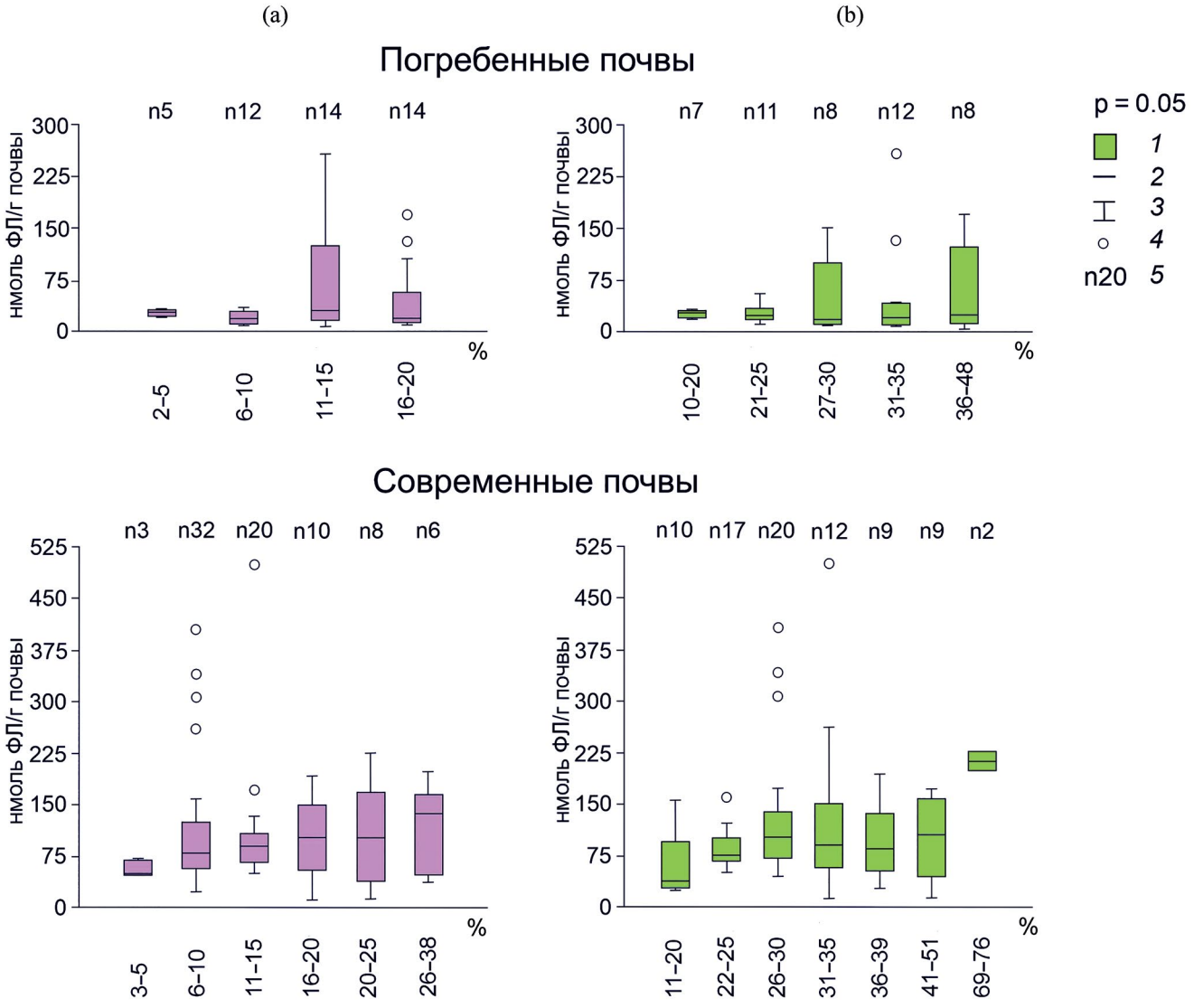


Рис. 5. Изменения значений микробной биомассы в погребенных и современных почвах в зависимости от содержания ила (a) и физической глины (b): *1* – межквартальное расстояние, *2* – медиана, *3* – min–max, *4* – выброс, *5* – число наблюдений.

гранулометрического состава[2]. При этом в современных почвах такая закономерность проявляется в меньшей степени; здесь высокие значения микробной биомассы можно увидеть и в почвах легкого гранулометрического состава. Таким образом, на сохранность микробной биомассы в погребенных почвах существенное влияние оказывает содержание ила.

Фактор солонцового процесса. Выше показано, что на уровне тенденции можно говорить о более низких значениях микробной биомассы в солонцах, по сравнению с зональными почвами. В этой связи представляется важным рассмотреть варьирование микробной биомассы в погребенных солонцах (рис. 6).

При анализе варьирования этого показателя хорошо заметна закономерность уменьшения содержания фосфолипидов в солонцах по мере увеличения мощности горизонта SEL. Эта тенденция наиболее заметна в случае с погребенным почвами: в корковых солонцах микробная биомасса была максимальной, несколько

[2] Исключение составляет лишь погребенная почва на низкой террасе под Валом Анны Иоанновны (точка 24), где была отмечена минимальная биомасса при высоком содержании ила. По-видимому, высокое содержание ила в данном случае является результатом специфических аллювиальных процессов и не связано с почвообразованием.

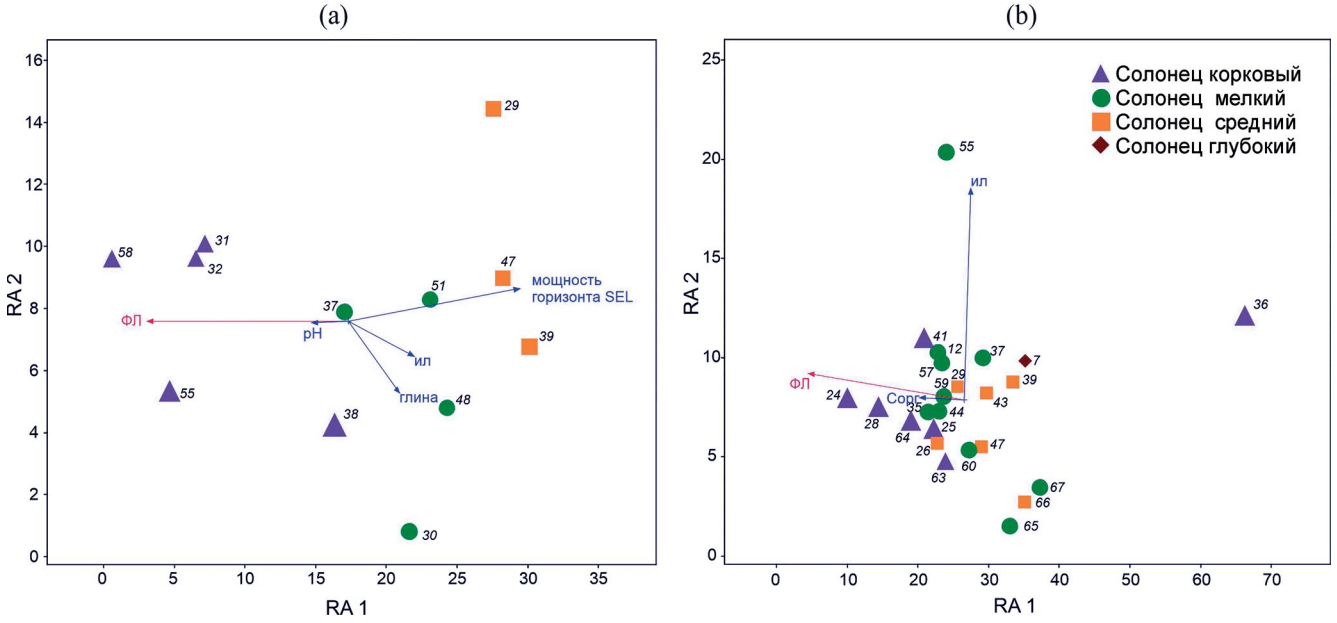


Рис. 6. Анализ избыточности для химических и микробиологических параметров в погребенных (a) и современных (b) солонцах. Условные обозначения см. рис. 2.

меньше – в солонцах мелких, и наименьшей – в солонцах средних. В современных почвах была отмечена та же тенденция. Полагаем, что это связано с приуроченностью корковых солонцов к микрозападинах эрозионной природы, что обусловливает дополнительное поступление в почву доступных для микроорганизмов элементов питания.

Фактор геоморфологической позиции. Геоморфологическая позиция (и связанные с ней литологические условия) может выступать в качестве еще одного фактора, влияющего на величину микробной биомассы. В этом отношении показательным является варьирование микробной биомассы в современных и погребенных почвах Царицынской оборонительной линии (Вал Анны Иоанновны) (рис. 7).

Максимальные значения микробной биомассы были выявлены в почвах верхней части склона северной экспозиции, а также в почвах привершинной зона локального водораздела. На склоне южной экспозиции эти показатели были значительно меньше. При этом минимальная микробная биомасса была в почвах надпойменной террасы и низкой поймы. Полагаем, что высокие значения микробной биомассы в почвах водоразделов могут быть следствием более длительного времени функционирования почвы в квазиравновесном состоянии. На поймах и речных террасах, где происходит активное накопление аллювия или эрозионного материала, величина микробной биомассы всегда оказывается ниже.

Фактор антропогенной деятельности. Антропогенная деятельность в определенных случаях может выступать как важнейший фактор почвообразования, определяющий многие свойства почв, в том числе величину микробной биомассы. Наиболее мощное воздействие на почвенное микробное сообщество наблюдается в культурных слоях древних поселений, что связано с поступлением в почву больших объемов органического материала. Рассмотрим особенности изменений микробной биомассы в культурных слоях поселений на примере трех памятников: поселения эпохи энеолита Мешоко (5700–5500 л.н., Республика Адыгея), многослойное поселения эпохи средней бронзы – раннего железного века Сотк-2 (XVIII–XVI вв. до н.э. – XI–IX вв. до н.э., Республика Армения) и поселение эпохи Средневековья Учкакар (XI–XIV вв.н.э., Удмуртская республика).

На рис. 8 хорошо видны характерные пики увеличения микробной биомассы в культурных слоях; при этом глубина залегания культурного слоя и характер перекрывающих отложений не играет существенной роли.

Культурный слой поселение Мешоко перекрыт склоновыми эрозионными наносами тяжелосуглинистого гранулометрического состава метровой мощности, культурный слой поселения Сокт-2 находится под слоем легкосуглинистых эоловых отложений мощностью 10–20 см, а на поселении Учкакар почвообразование идет непосредственно на слое культурных напластований. Заметное варьирование свойств культурного слоя поселения

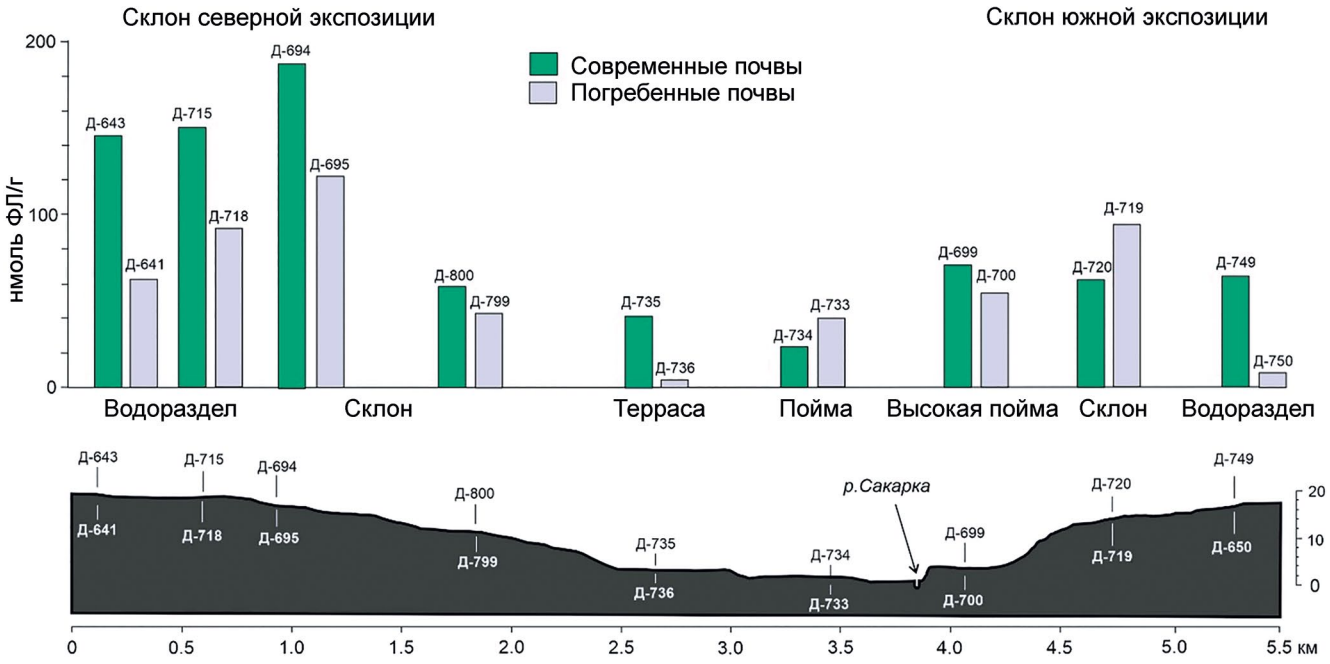


Рис. 7. Микробная биомасса в современных и погребенных почвах Царицынской оборонительной линии (Вал Анны Иоанновны) на разных элементах рельефа (на нижнем рисунке на темном фоне указаны номера разрезов погребенных почв, на светлом – их современные аналоги).

Учкакар на глубине 90–120 см объясняется чередованием слоев накопления минеральной массы и пожаров, что обуславливает резкое снижение содержания фосфолипидов. В культурных слоях поселения Мешоко следов пожаров не выявлено. После прекращения антропогенного поступления органических остатков в культурный слой, содержание фосфолипидов возвращается к уровню современных зональных почв – до 350–300 нмоль ФЛ/г почвы для темногумусовых карбонатных почв среднегорной зоны Кавказа (поселения Мешоко) и до 50–70 нмоль ФЛ/г почвы в случае с поселением Учкакар (подзона южной тайги). Для поселения Сотк-2 по археологическим данным не выявлено этапов прекращения хозяйственной деятельности, а варьирование значений содержания фосфолипидов связаны с различиями в объемах поступающих органических материалов на разных этапах функционирования памятника.

Можно предположить, что свой вклад в сохранение высокой микробной биомассы в культурных слоях поселения Мешоко и Сотк-2 внесли суглинистый гранулометрический состав, умеренная норма осадков, положение на склоне, исключающее промачивание, а также отсутствие пожаров в период формирования культурного слоя. Все эти факторы способствовали большей сохранности высокой биомассы живых микробных клеток, по сравнению с поселением Учкакар, расположенном в таежной зоне с культурным слоем супесчаного гранулометрического состава и высокой долей углей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ закономерностей изменений микробной биомассы в погребенных почвах позволяет сделать следующие выводы.

1. Величина микробной биомассы в верхнем горизонте погребенных почв в целом ниже, чем в их современных аналогах, и составляет в среднем 55 нмоль ФЛ/г (n = 61) при среднем содержании в современных почвах на уровне 107 нмоль ФЛ/г (n = 79).

2. Величина микробной биомассы слабо взаимосвязана со временем пребывания почвы в погребенном состоянии, но демонстрирует тренд к снижению по мере возрастания времени погребения. Для почв, находящихся в погребенном состоянии более 4000 лет, средние значения содержания фосфолипидов составляют 33 нмоль ФЛ/г почвы (n = 18), для погребенных почв возрастом до 2000 лет – 46 нмоль ФЛ/г почвы (n = 36), и для почв, погребенных 300 л.н. – 63 нмоль ФЛ/г почвы. Максимальные значения этого показателя выявлены в средневековых почвах, но малая выборка (n = 2) и большой разброс значений (257 и 31 нмоль ФЛ/г почвы) не позволяют опираться на эти данные.

3. Величина микробной биомассы не коррелирует с типом почв. В погребенных каштановых

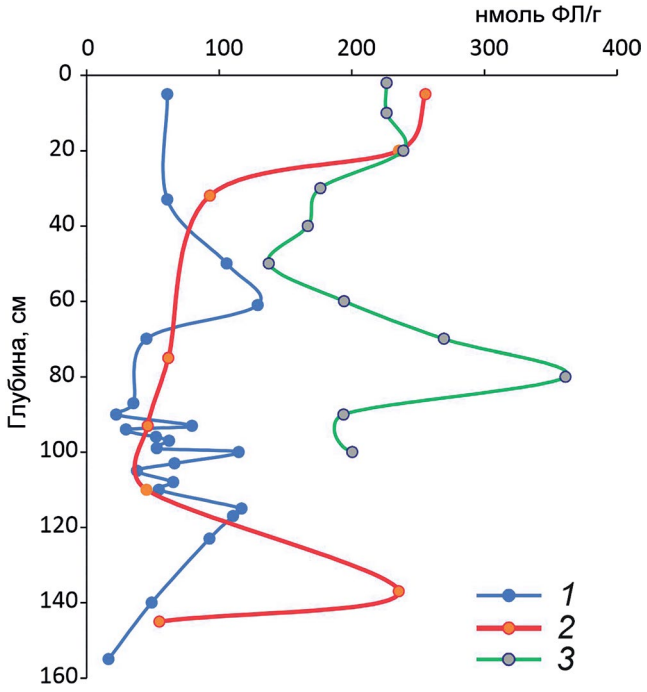


Рис. 8. Изменения микробной биомассы в культурных слоях древних поселений: *1* – поселение эпохи Средневековья Учкакар (XI–XIV вв.н.э., Удмуртская республика), *2* – поселение эпохи энеолита Мешоко (5700–5500 л.н., Республика Адыгея), *3* – поселения эпохи средней бронзы – раннего железного века Сотк-2 (XVIII–XVI вв. до н.э. – XI–IX вв. до н.э., Республика Армения).

и светло-каштановых почвах эпохи бронзы этот показатель превышает значения погребенных черноземов того же возраста. На уровне тенденции можно отметить меньшие значения этого показателя в солонцах, по сравнению с зональными почвами.

4. Величина микробной биомассы в погребенных почвах демонстрирует тесную корреляцию с гранулометрическим составом. При содержании ила <10% и физической глины <25% микробная биомасса минимальная. В современных почвах эта корреляция не выявлена.

5. В погребенных солонцах максимальные значения микробной биомассы выявлены в корковых и мелких подтипах. При увеличении мощности горизонта SEL этот показатель снижается.

6. Величина микробной биомассы зависит от интенсивности процессов поступления и потерь мелкозема. Максимальные значения микробной биомассы характерны для почв локальных водоразделов и склонов северной экспозиции. На склонах южной экспозиции этот показатель меньше из-за более низких объемов поступления растительных остатков и более активного плоскостного смыва. Минимальные значения микробной биомассы в почвах пойм и речных террас в зоне активной аккумуляции минерального субстрата.

7. В культурных слоях древних поселений микробная биомасса превышает значения современных почв. При этом культурные слои характеризуются очень сильным варьированием этого показателя, что связано с особенностями формирования культурного слоя и его последующими дигенетическими изменениями. В целом можно говорить, что величина микробной биомассы в культурных слоях древних поселений зависит от особенностей формирования данного слоя и физико-химических условий, в которых материал слоя находился в период от момента прекращения функционирования памятника до настоящего времени. Иными словами, величина микробной биомассы в культурных слоях, как и в погребенных почвах, определяется наличием условий, обеспечивающих поддержание микробного сообщества в жизнеспособном состоянии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ № 22-68-00010. В работе использованы данные, полученные при выполнении государственного задания № 0191-2022-0008.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александровский А.Л.* Степи Северного Кавказа в голоцене по данным палеопочвенных исследований // Степь и Кавказ. Тр. гос. Исторического музея. 1997. Вып. 97. С. 22–29.
2. *Александровский А.Л., Александровская Е.И.* Эволюция почв и географическая среда. М.: Наука, 2005. 223 с.
3. *Борисов А.В., Каширская Н.Н., Юршенас Д.А., Хомутова Т.Э., Петросян А.А., Мимоход Р.А.* Палеоэкологические условия в степной зоне Восточно-Европейской равнины в посткатакомбное время // Нижневолжский археологический вестник. 2022. Т. 21. С. 82–99.
4. *Геннадиев А.Н.* Почвы и время: модели развития. М.: Изд-во МГУ. 1990. 232 с.
5. *Демкин В.А., Борисов А.В., Удальцов С.Н.* Палеопочвы и климат юго-востока среднерусской возвышенности в эпохи средней и поздней бронзы (XXV–XV вв. до н.э.) // Почвоведение. 2010. № 1. С. 7–17.
6. *Демкин В.А.* Палеопочвоведение и археология: интеграция в изучении истории природы и общества. Пущино, 1997. 213 с.

7. *Демкин В.А., Гугалинская Л.А., Алексеев А.О. и др.* Палеопочвы как индикаторы эволюции биосферы. М.: НИА Природа, 2007. 282 с.
8. *Демкин В.А., Демкина Т.С., Алексеев А.О. и др.* Палеопочвы и климат степей Нижнего Поволжья в I–IV вв.н.э. Пущино, 2009. 96 с.
9. *Демкин В.А., Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Ельцов М.В.* Эволюция почв и динамика климата сухих степей Приволжской возвышенности за последние 3500 лет // Почвоведение. 2012. № 12. С. 1244–1258.
10. *Демкина Т.С., Борисов А.В., Хомутова Т.Э.* Сравнительная характеристика современных и погребенных почвенных комплексов в пустынно-степной зоне Волго-Донского междуречья // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1295–1306. http://dx.doi.org/10.1134/S0032180X19110029
11. *Демкина Т.С., Борисов А.В., Демкин В.А.* Микробиологические исследования подкурганных палеопочв пустынно-степной зоны Волго-Донского междуречья // Почвоведение. 2004. № 7. С. 853–859.
12. *Демкина Т.С., Борисов А.В., Демкин В.А.* Характеристика микробных сообществ палеопочв археологических памятников пустынно-степной зоны // Почвоведение. 2000. № 9. С. 1117–1126.
13. *Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Кузнецова Т.В., Контобойцева А.А., Борисов А.В.* Характеристика микробных сообществ погребенных почв Царицынской оборонительной линии (1718–1720 гг.) // Почвоведение. 2016. № 1. С. 65–78. http://dx.doi.org/10.7868/S0032180X15090026
14. *Дергачева М.И.* Археологическое почвоведение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 228 с.
15. *Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Мануфарова Н.А. и др.* Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1096. https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038
16. *Дущанова К.С., Хомутова Т.Э., Украинский П.А., Каширская Н.Н., Лисецкий Ф.Н., Борисов А.В.* Биомасса и функциональное разнообразие почвенных микробных сообществ лесных и пахотных почв (на примере заповедника “Белогорье”) // Почвоведение. 2022. № 4. С. 488–499. https://doi.org/10.31857/S0032180X22040086.
17. *Журбин И.В., Антипина Е.Е., Иванова М.Г., Лебедева Е.Ю., Модин Р.Н., Сергеев А.Ю., Яворская Л.В.* Междисциплинарные исследования Кушманского городища Учкакар IX–XIII вв.: методика комплексного анализа. М.: ТАУС, 2018. 248 с.
18. *Иванов И.В.* Эволюция почв степной зоны в голоцене. М.: Наука, 1992. 143 с.
19. *Иванов И.В., Васильев И.Б.* Человек, природа и почвы Рын-песков Волго-Уральского междуречья в голоцене. М.: Интеллект, 1995. 264 с.
20. *Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., Васенев В.И., Кудеяров В.Н., Валентини Р.* Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение № 9. 2014. С. 1077–1088. https://doi.org/10.7868/S0032180X14090056
21. *Каширская Н.Н., Хомутова Т.Э., Чернышева Е.В., Ельцов М.В., Демкин В.А.* Численность и суммарная биомасса микробных сообществ каштановых почв и солонцов сухостепной зоны Нижнего Поволжья // Почвоведение. 2015. № 3. С. 337–346. https://doi.org/10.7868/S0032180X15010098
22. *Каширская Н.Н., Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Ельцов М.В., Удальцов С.Н., Кузнецова Т.В., Идрисов И.А.* Биологическая активность бурых полупустынных почв бугров Бэра // Почвоведение. 2021. № 8. С. 946–956. https://doi.org/10.31857/S0032180X21080086
23. *Каширская Н.Н., Хомутова Т.Э., Демкина Т.С., Ельцов М.В., Борисов А.В.* Изменчивость микробной биомассы в палеопочвах разновозрастных курганов Нижнего Поволжья в связи с динамикой увлажненности климата // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22 (1). С. 20–30.
24. *Каширская Н.Н., Хомутова Т.Э., Кузнецова Т.В., Шишлина Н.И., Борисов А.В.* Динамика химических и микробиологических свойств почв пустынно-степной зоны юго-востока Русской равнины во второй половине голоцена // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24 (1). С. 54–64.
25. *Махонина Г.И., Валдайских В.В.* Заключение по почвенным исследованиям археологических памятников. // Коловское городище (Древности Ингальской долины: археолого-палеоэкологиические исследования. Вып. № 2. Новосибирск: Наука, 2008. Прил. 1. С. 201–207.
26. *Плеханова Л.Н., Демкин В.А., Зданович Г.Б.* Эволюция почв речных долин степного Зауралья во второй половине голоцена. М.: Наука, 2007. 236 с.
27. *Семенов М.В., Чернов Т.И., Железова А.Д., Никитин Д.А., Тхакахова А.К., Иванова Е.А., Ксенофонтова Н.А. и др.* Микробные сообщества межледниковых и интерстадиальных палеопочв позднего плейстоцена // Почвоведение. 2020. № 6. С. 716–725. https://doi.org/10.31857/S0032180X20060106
28. Теории и методы физики почв. Коллективная монография / Под ред. Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского. М.: “Гриф и К”, 2007. 616 с.
29. *Хомутова Т.Э. Демкина Т.С., Борисов А.В., Шишлина Н.И.* Состояние микробных сообществ подкурганных палеопочв пустынно-степной зоны эпохи средней бронзы (XXVII–XXVI вв. до н.э.) в связи с динамикой увлажненности климата // Почвоведение. 2017. № 2. С. 239–248. https://doi.org/10.7868/S0032180X1702006X

30. *Хомутова Т.Э., Демкин В.А.* Оценка биомассы микробных сообществ почв сухих степей по содержанию в них фосфолипидов // Почвоведение. 2011. № 6. С. 748–754.

31. *Чимитдоржиева Э.О., Чимитдоржиева Г.Д.* Углерод микробной биомассы мучнисто-карбонатных черноземов Западного Забайкалья // Агрохимия. 2013. № 8. С. 3–10.

32. *Чендев Ю.Г.* Позднеголоценовая эволюция чернозёмов юга центральной лесостепи // Почвоведение. 2001. № 3. С. 266–277.

33. *Чернов Т.И., Железова А.Д.* Динамика микробных сообществ в различных диапазонах времени (обзор) // Почвоведение. 2020. № 5. С. 590–600. https://doi.org/10.31857/S0032180X20050044

34. *Чернов Т.И., Железова А.Д., Кутовая О.В., Макеев А.О., Тхакахова А.К., Бгажба Н.А., Курбанова Ф.Г. и др.* Сравнительная оценка структуры микробиомов погребенных и современных почв при помощи анализа микробной ДНК // Микробиология. 2018. Т. 87. № 6. С. 737–746. http://dx.doi.org/10.1134/S0026365618060071

35. *Шитиков В.К., Зинченко Т.Д.* Многомерный статистический анализ экологических сообществ (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 1. С 5–11. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-1-005-011

36. *Эрлих В.Р., Годизов Г.Л., Борисов А.В.* Новый постдольменный археологический комплекс "Севастопольский" в Майкопском районе Республики Адыгея. Первые результаты исследования. Материалы Международной научной конференции по археологии Северного Кавказа. Майкоп: ООО "Качество", 2022. С. 117–122.

37. *Якимов А.С., Демкин В.А., Алексеев А.О.* Природные условия степей Нижнего Поволжья в эпоху средневековья (VIII–XIV вв.н.э.). М.: НИА-Природа, 2007. 228 с.

38. *Bargali K., Manral V., Padalia K., Bargali S.S., Upadhya V.P.* Effect of vegetation type and season on microbial biomass carbon in Central Himalayan forest soils, India // Catena. 2018. V. 171. P. 125–135. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.001

39. *Chernysheva E.V., Amiryan M.A., Eltsov M.V., Petrosyan A.A., Potapova A.V.* Reconstruction of particularities of ancient human activity based on geochemical and soil microbiological investigation of Sotk-2 site (Republic of Armenia). History, Archeology and Ethnography of the Caucasus. 2022. V. 18 (4). P. 993–1013. https://doi.org/10.32653/CH184993-1013

40. *Das D., Sahoo S., Das R., Datta S.C.* Advances in clay research for sustainable agriculture // Soil management for sustainable. Agriculture Apple Academic Press. 2022. P. 3–47. http://dx.doi.org/10.1201/9781003184881-2

41. *Demkin V.A., Borisov A.V., Demkina T.S., Khomutova T.E., Kashirskaya N.N.* Evolution of soils and dynamics of the climate of steppes in the Southeast of the Russian plain during the Late Eneolithic and Bronze Ages (fourth to second Millennium BC) // Eurasian Soil Science. 2010. № 13. P. 1515–1526. https://doi.org/10.1134/S1064229310130107

42. *Demkina T.S., Khomutova T.E., Kashirskaya N.N. et al.* Age and activation of microbial communities in soils under burial mounds and in recent surface soils of steppe zone // Eurasian Soil Science. 2008. V. 41. P. 1439–1447. https://doi.org/10.1134/S1064229308130139

43. *Ding S., Lange M., Lipp J., Schwab V.F., Chowdhury S., Pollierer M.M., Krause K. et al.* Characteristics and origin of intact polar lipids in soil organic matter // Soil Biol. Biochem. 2020. V. 151. P. 108045. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108045

44. *Findlay R.* The use of phospholipid fatty acids to determine microbial community structure // Molecular Microbial Ecology Manual. 1996. V. 4.1.4. P. 1–17.

45. *Khokhlova O., Sverchkova A., Myakshina T., Makeev A., Tregub T.* Environmental trends during the Bronze Age recorded in paleosols buried under a big kurgan in the steppes of the Ponto-Caspian area // Quat. Int. 2020. V. 583. P. 83–93. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.019

46. *Khomutova T.E., Demkina T.S., Borisov A.V., Kashirskaya N.N., Yeltsov M.V., Demkin V.A.* An assessment of changes in properties of steppe kurgan paleosoils in relation to prevailing climates over recent millennia // Quat. Res. 2007. V. 67. P. 328–336. https://doi.org/10.1016/j.yqres.2007.01.001

47. *Khomutova T.E., Eltsov M.V.* Biomass of living microorganisms in the exposed surface soils and the subkurgan palaeosols in the dry steppes of Russia // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Conference Proceeding. 2019. P. 57–64. http://dx.doi.org/10.5593/sgem2019/3.2/S13.008

48. *Khomutova T.E., Kashirskaya N.N., Demkina T.S., Kuznetsova T.V., Fornasier F., Shishlina N.I., Borisov A.V.* 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 // Quat. Int. 2019. V. 507. P. 84–94. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.02.013

49. *Makeev A., Aseyeva E., Rusakov A., Sorokina K., Puzanova T., Khokhlova O., Kust P. et al.* The environment of the Early Iron Age at the southern fringe of the forest zone of the Russian Plain // Quat. Int. 2018. V. 502. P. 218–327. http://doi.org./10/1016/j.quaint.2018.04.002

50. *Pietri J.C.A., Brookes P.C.* Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil // Soil Biol. Biochem. 2008. V. 40. P. 1856–1861. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.020

51. *Rusakov A., Makeev A., Khokhlova O., Kust P., Lebedeva M., Chernov T., Golueva A. et al.* Paleoenvironmen-

tal reconstruction based on soils buried under Scythian fortification in the southern forest-steppe area of the East European Plain // Quat. Int. 2018. V. 502. P. 197–217. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.05.016

52. *Singh P., Benbi D.K.* Physical and chemical stabilization of soil organic matter in cropland ecosystems under rice–wheat, maize–wheat and cotton–wheat cropping systems in northwestern India // Carbon Management. 2021. V. 12. P. 603–621. https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1992505
53. *Wang D., Zang S., Wu X., Ma D., Li M., Chen Q. et al.* Soil organic carbon stabilization in permafrost peatlands // Saudi J. Biol. Sci. 2021. V. 28. P. 7037–7045. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.07.088
54. *Xu X., Thornton P.E., Post W.M.* A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems // Glob. Ecol. Biogeogr. 2013. V. 22. P. 737–749. https://doi.org/10.1111/geb.12029
55. *Yuan B.C., Li Z.Z., Liu H., Gao M., Zhang Y.Y.* Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions // Appl. Soil Ecol. 2007. V. 35. P. 319–328. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.07.004
56. *Zhang Y., Sun G., Yang Y., Wu X.* Reconstruction of the use of space at Tianluoshan, China, based on palynological and lipid evidence // Environmental Archaeology. 2022. V. 27. P. 461–473. https://doi.org/10.1080/14614103.2020.1829299
57. *Zhang Y., Zheng N., Wang J., Yao H., Qiu Q., Chapmanf S.J.* High turnover rate of free phospholipids in soil confirms the classic hypothesis of PLFA methodology // Soil Biol. Biochem. 2019. V. 135. P. 323–330. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.05.023

Factors Determining the Variation of Microbial Biomass in Modern and Buried Soils of the Steppe Zone

T. E. Khomutova[1], E. V. Chernysheva[1, *], N. N. Kashirskaya[1], K. S. Dushchanova[1], A. A. Petrosyan, M. V. Eltsov[1], and A. V. Borisov[1]

[1]Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia

**e-mail: e.chernyysheva@yandex.ru*

The article summarizes the results of long-term studies of microbial biomass in buried soils of archaeological sites and modern background soils. Geographically, the objects of study cover the southeast of the Russian Plain, the Caspian lowland, the Western Caucasus, and the Crimea. A very representative amount of data has been accumulated on the chronogeographic patterns of changes in microbial biomass in chernozems (Chernozem mollic), chestnut soils (Kastanozems Haplic), light chestnut soils (Cambisols salic), and solonetzes (Solonetz Humic). Chronological framework – the era of the Eneolithic – Modern times (5700–300 years ago). The biomass of soil microbial communities was estimated from the content of phospholipids in the soil. This method makes it possible to determine the biomass of living cells preserved in the buried soil and to evaluate the influence of environmental factors in which soil microbial community was presented from the moment of burial. It has been shown that the microbial biomass in buried soils is not determined by the type of soil and the time the soil remains in the buried state. The average value of the content of phospholipids in buried soils is two times lower than in modern ones, but no correlation of microbial biomass with duration of soil buried state was found. To a greater extent, the content of phospholipids in buried soils depended on the content of silt; at a silt content of less than 10%, the values of microbial biomass were minimal. Geomorphological position acts as a significant factor influencing the value of microbial biomass. Thus, the maximum values of microbial biomass are typical for soils of local watersheds and slopes of northern exposure. In Solonetzes, an inverse correlation was noted between microbial biomass and the thickness of the SEL horizon. In the cultural layers of ancient settlements, the microbial biomass exceeds the values of modern soils and depends on the characteristics of the economic use of the territory and the volume of incoming anthropogenic substrates.

Keywords: microbial communities, phospholipids, dry steppe, archaeological soil science