

УДК 631.48:930.26

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ БУРЫХ ПОЛУПУСТЫННЫХ ПОЧВ БУГРОВ БЭРА

© 2021 г. Н. Н. Каширская^{а, *}, Т. С. Демкина^а, Т. Э. Хомутова^а, М. В. Ельцов^а,
С. Н. Удальцов^а, Т. В. Кузнецова^а, И. А. Идрисов^б

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

^бИнститут геологии ДНЦ РАН, ул. М. Ярагского, 75, Махачкала, 367030 Россия

*e-mail: nkashirskaya81@gmail.com

Поступила в редакцию 26.06.2020 г.

После доработки 21.01.2021 г.

Принята к публикации 27.01.2021 г.

В бурых полупустынных почвах бугров Бэра (Eutric Cambisols (Loamic, Protocalcic)) Астраханской области, сформированных в различных гидротермических условиях и характеризующихся разным гранулометрическим составом, по содержанию органического углерода, суммарной микробной биомассе, биомассе живых микробных клеток и индексу олиготрофности микробных сообществ оценена биологическая активность. Показано, что содержание органического углерода в почвах более засушливых территорий на южной и западной границах зоны распространения бугров Бэра в 1.5–2 раза меньше по сравнению с почвой на северной границе зоны их распространения. Наибольший индекс олиготрофности микробного сообщества, указывающий на высокую долю микроорганизмов, максимально приспособленных к засушливым условиям, отмечен в почвенном профиле южного ключевого участка. Изменчивость суммарной и живой микробной биомассы была преимущественно связана с гранулометрическим составом бурых полупустынных почв, особенно в верхнем горизонте, где их величины в глинистой почве были в 1.5–2 раза больше, чем в песчаной. Сравнение с современными каштановыми почвами (Haplic Kastanozems, Cambisols, Calcisols) и солонцами (Solonetz) выявило наименьшие показатели суммарной и живой микробной биомассы в бурых полупустынных почвах бугров Бэра. Показано сходство этих почв с каштановидными палеопочвами суббореального ксеротерма рубежа III–II тыс. до н. э. по суммарной микробной биомассе, тогда как биомасса живых микробных клеток в каштановидных палеопочвах в 6–9 раз превышала содержание в современных бурых полупустынных и варьировала на уровне современных светло-каштановых почв и солонцов.

Ключевые слова: микробная биомасса, биомасса живых микробных клеток

DOI: 10.31857/S0032180X21080086

ВВЕДЕНИЕ

Бэровские бугры представляют собой характерные формы рельефа для южной части Прикаспийской низменности [30, 32]. Наиболее ярко они представлены к западу от дельты р. Волга, где занимают территорию протяженностью в 150 км с севера на юг и шириной более 80 км на широте г. Астрахань. Особенно широко развиты бугры Бэра в верхней части дельты Волги [20]. Вдоль западной периферии низовий р. Урал и между низовьями Урала и Эмбы они выражены менее ярко [29]. В настоящее время проводятся поиски аналогичных форм рельефа на различных континентах земного шара [41].

В области своего классического развития бугры Бэра представляют собой вытянутые прямолинейные гряды протяженностью 3–20 км, шириной

200–500 м, высотой 10–20 м, с пологовыпуклыми вершинами и выположенными склонами [21]. Межбугровые понижения шириной 400–1000 м по мере приближения к дельте Волги заполняются озерами (ильменями), а с удалением от дельты Волги – солончаками. Все населенные пункты, большая часть различных коммуникаций и пахотных угодий данной территории расположены на буграх.

Практически повсеместное развитие аналогичных форм, скрытых чехлом новокаспийских отложений, установлено на дне Северного Каспия [3]. Существует множество гипотез о генезисе Бэровских бугров [2, 5, 29, 30]. Бэр [4] относил бугры к аккумулятивным формам рельефа, образованным в результате катастрофического сброса каспийских вод по Манычу. Исследования де-

формаций водной поверхности и песчаного дна при быстром сбросе воды в экспериментальном водоеме показали, что существующий грядовый рельеф действительно мог быть создан потоком, возникшим при внезапном понижении уровня воды в Каспийском море [25, 45]. К настоящему времени наибольшее признание получила гипотеза, предложенная Свиточем [30–33], согласно которой бугры Бэра сформировались в условиях длительной изменчивости уровня Каспийского моря. При повышенном уровне моря материал бугров накапливался в результате морских нагонов; понижение уровня моря приводило к частичному размыванию накопленного материала за счет речного стока. Характерной особенностью отложений, слагающих аккумулятивные ядра бугров, в первую очередь, их нижнюю часть, является наличие глиняного песка, представленного микроагрегатами различных глинистых минералов [38, 39], размеры которых соответствуют песчаной фракции и крупнее. Эти агрегаты отличаются прочностью и представляют собой переотложенные обломки хвалыньских шоколадных глин [33], широко развитых на Прикаспийской низменности. В нижней части бугров отложения отличаются наибольшим содержанием глинистых компонентов и раковинного детрита, могут включать целые раковины хвалыньских моллюсков. В зависимости от взаимного сочетания ниже- и верхнебугровых отложений в составе аккумулятивного ядра выделяется два типа строения бугров Бэра, каждый из которых включает два подтипа. Ядро первого типа сложено толщами ниже- и верхнебугровых отложений, ядро второго типа – одной какой-либо толщей, уцелевшей от размывания. Таким образом, выделяется четыре варианта строения бугров: 1а – нижебугровые отложения составляют основную часть ядра и равномерно облекаются верхнебугровой толщей, 1б – ниже- и верхнебугровые отложения частично размывы, 2а – частично сохранились только нижебугровые отложения, 2б – частично сохранились только верхнебугровые отложения [31].

Антропогенная деградация почв аридных территорий относится к ряду глобальных экологических проблем, переживаемых человечеством в настоящее время, и широко освещена в ряде российских [14, 22, 26, 27] и зарубежных [40, 44, 49] работ. В этой связи исключительную важность представляет эколого-почвенное исследование засушливых территорий с целью защиты земель от деградации. Бэровские бугры препятствуют процессам опустынивания аридных ландшафтов [34]. Пространства, окружающие ненарушенные бугры, используются в качестве сенокосов и пастбищ [5]. Экологическая уязвимость бугровых ландшафтов с каждым годом усугубляется хозяйственной деятельностью человека. Материал бугров используется в дельте Волги для защиты от паводковых вод, служит источни-

ком сырья для производства кирпичей, широко применяется при строительстве дорог. Разрушение бугров Бэра приводит к уменьшению содержания гумуса в почвах околобугровых пространств, их переуплотнению и потере плодородия. Показано, что в почвах ландшафта вокруг разрушенного бугра Бэра на отдельных участках произошла полная потеря гумуса, а среднее его содержание составляет 0.095% по сравнению с 2.95% в окрестностях бугра с незначительными нарушениями и 3.13% в окрестностях ненарушенного бугра [34].

Геоинформационный анализ показывает значительное уничтожение Бэровских бугров, приводящее к опасным изменениям структуры почвенного покрова, солевого баланса и структуры биоценозов [24]. В настоящее время, в той или иной степени, разрушены около 80% бугров Бэра [46]. Полное их уничтожение может привести к глобальной перестройке геохимической обстановки на территории Астраханской области [5].

Ковда [19] относит бурые почвы зонального ряда, располагающиеся на буграх Бэра, к пустынно-степному ряду почвообразования при слабой биогенной аккумуляции. Профильное распределение биологических параметров этих почв зависит от их гранулометрического состава, степени засоленности, солонцеватости и карбонатности [15]. Показано, что интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) каштановых почв и бурых полупустынных почв бугров Бэра в значительной степени определяется климатическими параметрами [15]. ИПБС для каждой почвы рассчитывался как среднее значение процентов интенсивности почвенного дыхания, ферментативной активности, численности микроартропод и численности микроорганизмов различных функциональных групп от максимальных величин этих показателей в ряду исследуемых почв. Установлена высокая численность (до сотен тысяч и миллионов КОЕ/г почвы) актиномицетов, выделяемых из засоленных почв на территории ландшафтов бугров Бэра [23]. Активность микробных комплексов бугров Бэра в высокой степени подвержена сезонным изменениям [28]. Оценка фосфатной активности бурых полупустынных почв бугров Бэра [16] выявила значения, близкие к таковым в почвах сухих тропических лесов [48] – на два порядка меньше, чем в каштановых почвах [16], и на два порядка больше по сравнению с почвами пустынь [47]. В работах, посвященных палеоэкологическому кризису в степях Нижнего Поволжья на рубеже III–II тыс. до н. э., высказано предположение о сходстве каштановидных эродированных почв, присутствующих в почвенном покрове этого времени, с современными бурыми полупустынными почвами [11, 36, 42].

Цель работы – оценка физико-химических и микробиологических характеристик бурых полу-

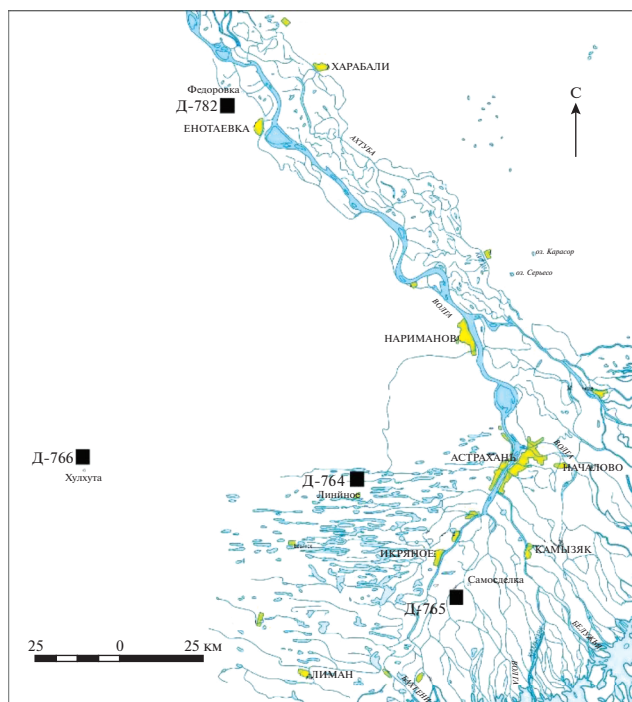


Рис. 1. Карта района исследований. Расположение ключевых участков.

пустынных почв бугров Бэра в зависимости от литологических и климатических условий, сравнение этих объектов с современными каштановыми почвами и солонцами, а также установление их сходства и различия с каштановидными палеопочвами суббореального ксеротерма рубежа III–II тыс. до н. э.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследовали целинные бурые полупустынные почвы (Eutric Cambisols (Loamic, Protocalcic)) на вершинах бугров Бэра в Наримановском, Икрянинском и Енотаевском районах Астраханской области, а также в Яшкульском районе Республики Калмыкия. На территории Астраханской области были изучены следующие ключевые участки. В Енотаевском районе (северная граница зоны распространения бугров Бэра), в 5 км к юго-западу от с. Федоровка, заложен разрез Д-782. Проективное покрытие полынно-овсяговой растительной ассоциации составляло 60–70%, наблюдался степной войлок. Почва идентифицирована как бурая полупустынная несолонцеватая незасоленная [18].

В Наримановском районе (центральная часть зоны распространения бугров Бэра), в 8 км к западу от с. Линейного, на бугре у соленого ильменя заложен разрез Д-764. В составе растительного сообщества доминировала полынь, присутствовали солянки, типчак и разнотравье. Проективное покрытие растительной ассоциации состав-

ляло менее 30%. Почва – бурая полупустынная несолонцеватая солончаковатая.

В Икрянинском районе, в 2 км от с. Самосделка (южная часть зоны распространения бугров Бэра), заложен разрез Д-765. Проективное покрытие полынной ассоциации с участием типчака и разнотравья составляло здесь около 40%. Почва – бурая полупустынная несолонцеватая солончаковатая карбонатная.

На территории Республики Калмыкия исследован ключевой участок, расположенный в 1.5 км к северо-западу от с. Хулхута Яшкульского района. Здесь на западной границе зоны распространения бугров Бэра заложен разрез Д-766. Проективное покрытие полынно-типчаковой ассоциации составляло около 50%. Почва – бурая полупустынная несолонцеватая глубокосолончаковатая.

Таким образом, ключевые участки Астраханской области распределены по направлению с севера на юг в следующем порядке (рис. 1): “Федоровка” (Д-782)–“Линейное” (Д-764)–“Самосделка” (Д-765). Ключевые участки “Линейное” и “Самосделка” удалены от участка “Федоровка” соответственно на 125 и 165 км. Ключевой участок “Хулхута” (Д-766) расположен в 120 км к юго-западу от участка “Федоровка”.

Для анализа использовали почвенные образцы, отобранные в августе, репрезентативно по генетическим горизонтам, с соблюдением условий стерильности. Гранулометрический состав почв, содержание органического углерода, кислотность, содержание солей определяли стандартными методами [1] в ЦКП ИФХиБПП РАН. Магнитную восприимчивость почвенных образцов измеряли в полевых условиях с помощью каппаметра КТ-5. В верхней части профиля почв (горизонты А1, В1 и В2) определяли суммарную микробную биомассу [17, 35] и биомассу живых микробных клеток по содержанию почвенных фосфолипидов [37]. Для оценки индекса олиготрофности микробного сообщества [8–11] проводили посевы почвенных микроорганизмов на твердые питательные среды. Учет олиготрофных микроорганизмов, использующих элементы питания из рассеянного состояния, производили на почвенном агаре (ПА) следующего состава (г/л): бурая полупустынная почва из соответствующего горизонта – 200, агар – 20. Для учета микроорганизмов, разлагающих растительные остатки, использовали богатую органическую среду (БС, г/л): сухой питательный агар – 3, пептон – 3, триптон – 1, дрожжевой экстракт – 1, глюкоза – 1, агар – 20. Индекс олиготрофности рассчитывали по формуле $ПА/БС \times 100$, где ПА – численность КОЕ микроорганизмов, растущих на почвенном агаре, БС – численность КОЕ микроорганизмов, растущих на богатой среде. Численность КОЕ почвенных грибов определяли на среде Чапека (г/л): $KCl - 0.5, MgSO_4 - 0.5,$

KH_2PO_4 – 1, FeSO_4 – 0.01, NaNO_3 – 2, глюкоза – 20, агар – 20, с добавлением молочной кислоты 1.2 мл [13].

Эксперименты проводили в трех повторностях. Данные статистически обрабатывали стандартными методами [12], с помощью построения диаграмм box plot [43] и методом главных компонент в программе Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические свойства бурых полупустынных почв бугров Бэра. В табл. 1 представлены физико-химические свойства бурых полупустынных почв бугров Бэра. В верхней части профиля в каждом почвенном разрезе измеряли полевую влажность. Ее величины коррелировали с величинами содержания илистой и глинистой фракций, коэффициенты корреляции в обоих случаях составляли 0.85. Наиболее тяжелой по гранулометрическому составу и наиболее увлажненной была бурая полупустынная солончаковатая почва на ключевом участке “Линейное”, расположенном у соленого ильмена. Остальные почвы по гранулометрическому составу и влажности были близки между собой.

Содержание органического углерода в верхнем почвенном горизонте уменьшалось по мере продвижения ключевых участков в южном направлении. Почва ключевого участка “Хулхута” на западной границе зоны распространения бугров Бэра по содержанию органического углерода в верхнем горизонте была сравнима с почвой ключевого участка “Самосделка”, на южной границе их распространения. В иллювиальном горизонте содержание органического углерода во всех случаях уменьшалось по сравнению с верхним горизонтом.

Бурые полупустынные солончаковатые почвы, сформированные в зоне частой встречаемости бугров Бэра, включая южную границу их распространения, отличались большим содержанием гипса и легкорастворимых солей по сравнению с почвами, приуроченными к северной и западной границе распространения этих объектов. Особенно высокой степенью засоленности отличалась суглинистая почва ключевого участка “Линейное”.

В незасоленной почве в северной части зоны распространения бугров Бэра (ключевой участок “Федоровка”) отмечено небольшое содержание карбонатов в верхней части профиля. В остальных почвах, расположенных на территориях с более сухим климатом, карбонаты подтягивались к поверхности. К дополнительным отличиям незасоленной почвы на ключевом участке “Федоровка” можно отнести уменьшение значений рН и магнитной восприимчивости профиля по сравнению с почвами остальных объектов, расположенных южнее.

Микробная биомасса бурых полупустынных почв бугров Бэра. Суммарная микробная биомасса (С-СМБ) и биомасса живых микробных клеток (С-ФЛ), а также доля этих показателей в органическом углероде почвы, представлены в табл. 2. Максимальной суммарной биомассой, а также максимальной ее долей в органическом углероде почвы, характеризовалось микробное сообщество верхнего горизонта суглинистой солончаковатой почвы ключевого участка “Линейное”, в центральной части зоны распространения бугров Бэра. На остальных объектах суммарная микробная биомасса верхнего горизонта снижалась по мере увеличения аридизации климатических условий. Горизонты В1 по величинам С-СМБ практически не различались между объектами, так же как горизонты В2. Исключение составляла бурая полупустынная почва на ключевом участке “Федоровка”, где зафиксировано достоверно большее значение С-СМБ в иллювиальном горизонте. По биомассе живых микробных клеток верхнего горизонта выделялась почва на ключевом участке “Линейное”. Здесь показатель С-ФЛ был в 2 раза больше, чем в остальных достоверно неразличимых вариантах. Минимальными величинами биомассы живых микробных клеток характеризовались второй и третий горизонты бурой полупустынной почвы на ключевом участке “Федоровка”. На остальных объектах показатели С-ФЛ в иллювиальных горизонтах и горизонтах В2 в большей части случаев варьировали на уровне 87–108 мкг С/г почвы практически без достоверных различий. Исключение составляла почва на южной границе зоны распространения бугров Бэра, где значение С-ФЛ в горизонте В2 приближалось к уровню верхнего горизонта. Можно заключить, что на буграх Бэра изменчивость суммарной микробной биомассы и биомассы живых микробных клеток была преимущественно связана с гранулометрическим составом почвы.

Индекс олиготрофности бурых полупустынных почв бугров Бэра. Для оценки индекса олиготрофности микробного сообщества подсчитывали численность КОЕ олиготрофных бактерий, культивируемых на почвенном агаре, и численность КОЕ бактерий, использующих в качестве источника питания растительные остатки, культивируемых на богатой среде (табл. 3). На обоих вариантах питательной среды численность КОЕ убывала вниз по профилю почвы, что согласуется с литературными данными [28]. В почве на северной границе зоны распространения бугров Бэра индексы олиготрофности были в 5–10 раз меньше, чем на остальных объектах. Здесь наблюдалась максимальная численность КОЕ грибов, растущих на среде Чапека. Максимальный индекс олиготрофности был выявлен в почве на южной границе зоны распространения бугров Бэра (ключевой участок “Самосделка”). В наиболее засоленной сугли-

Таблица 1. Физико-химические свойства бурых полупустынных почв бугров Бэра

Горизонт, глубина, см	Влажность, %	C _{орг} , %	pH H ₂ O	CaCO ₃ , %	CaSO ₄ , %	Сумма солей, %	Магнитная восприимчивость, <i>n</i> × 10 ⁻⁵ ед. СИ	Содержание фракции, %	
								<0.01 мм	<0.001 мм
Северная граница распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Федоровка". Разрез Д-782									
A1, 0–15	1.77	0.44	7.8	0.7	–	0.04	16	14	9
B', 15–30	0.73	0.26	8.2	0.7	–	0.04	18	19	13
B'', 30–40	1.01	0.23	8.3	0.7	0.02	0.04	18	12	7
BC, 40–75	–	0.27	8.5	0.7	0.02	0.03	23	15	9
C, 75–110	–	–	8.4	0.9	0.04	0.04	26	21	16
C _{Ca} , 110–130	–	–	8.7	10.6	0.07	0.06	19	25	16
C _{Ca} '', 130–150	–	–	8.9	4.2	0.04	0.05	13	18	11
Центральная часть зоны распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Линейное". Разрез Д-764									
A1, 0–14	3.61	0.32	8.2	6.5	0.04	0.13	24	41	29
B1, 14–33	5.50	0.11	7.8	5.0	1.90	0.74	22	46	31
B2s, 33–52	4.70	0.28	8.7	4.8	0.41	0.54	20	35	23
BC _{Ca} , 52–65(75)	–	–	8.3	6.0	1.61	1.17	19	40	28
C, 65(75)–90(100)	–	–	8.1	5.2	1.61	1.29	19	40	25
CD, 90(100)–125	–	–	8.5	3.6	0.25	0.71	17	36	25
Южная граница зоны распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Самосделка". Разрез Д-765									
A1, 0–12	1.55	0.26	8.4	3.8	0.02	0.05	22	19	10
B1, 12–35	1.91	0.19	8.8	9.4	0.11	0.12	17	22	14
B2, 35–47(50)	7.44	0.15	9.5	9.4	0.02	0.20	20	41	28
D1, 47(50)–100	–	–	8.2	3.5	0.23	0.39	16	19	14
D2, 100–130	–	–	8.5	3.4	0.07	0.40	15	17	12
Западная граница зоны распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Хулхуга". Разрез Д-766									
A1, 0–10	1.04	0.24	8.1	1.2	0.04	0.10	16	16	10
B1, 10–22	2.21	0.12	8.0	5.0	0.05	0.05	20	27	17
B2s, 22–44	2.91	0.17	8.5	7.2	0.01	0.06	17	37	25
BC _{Ca} 44–70	–	–	9.5	4.4	0.07	0.16	17	34	25
C1, 70–85	–	–	9.5	2.4	0.04	0.16	15	23	18
C2s,г, 85–130	–	–	8.5	2.9	0.16	0.29	14	24	12

Таблица 2. Микробная биомасса бурых полупустынных почв бугров Бэра

Горизонт, глубина, см	Суммарная микробная биомасса (С-СМБ), мкг С/г	С-СМБ/С _{орг} , %	Биомасса живых микробных клеток (С-ФЛ), мкг С/г	С-ФЛ/С _{орг} , %
Северная граница распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Федоровка".				
Разрез Д-782				
A1, 0–15	497 ± 88	11	157 ± 2	4
B, 15–30	602 ± 70	23	55 ± 18	2
B", 30–40	325 ± 37	14	51 ± 13	2
Центральная часть зоны распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Линейное".				
Разрез Д-764				
A1, 0–14	698 ± 59	22	319 ± 158	10
B1, 14–33	467 ± 55	42	91 ± 26	8
B2s, 33–52	355 ± 27	12	107 ± 2	4
Южная граница зоны распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Самосделка".				
Разрез Д-765				
A1, 0–12	434 ± 34	17	144 ± 5	6
B1, 12–35	426 ± 48	22	91 ± 13	5
B2, 35–50	389 ± 39	26	140 ± 28	9
Западная граница зоны распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Хулхута".				
Разрез Д-766				
A1, 0–10	372 ± 13	16	151 ± 11	6
B1, 10–22	459 ± 39	38	108 ± 25	9
B2ca, 22–44	320 ± 50	19	87 ± 16	5

Таблица 3. Численность микроорганизмов, растущих на твердых питательных средах, и индекс олиготрофности бурых полупустынных почв бугров Бэра

Горизонт, глубина, см	Численность микроорганизмов, растущих на твердых питательных средах, млн КОЕ/г почвы		Численность грибов на среде Чапека, тыс. КОЕ/г почвы	Индекс олиготрофности ПА/БС × 100
	почвенный агар	богатая среда		
Северная граница распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Федоровка".				
Разрез Д-782				
A1, 0–15	35.17 ± 1.07	24.15 ± 0.30	218.37 ± 14.34	146
B, 15–30	3.29 ± 0.17	2.06 ± 0.05	14.61 ± 0.99	160
B", 30–40	3.03 ± 0.09	1.85 ± 0.08	10.44 ± 0.53	164
Центральная часть зоны распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Линейное".				
Разрез Д-764				
A1, 0–14	54.23 ± 0.90	5.91 ± 0.79	7.56 ± 1.37	918
B1, 14–33	5.92 ± 0.16	1.06 ± 0.04	2.32 ± 0.12	558
B2s, 33–52	4.86 ± 0.10	0.93 ± 0.03	1.88 ± 0.12	523
Южная граница зоны распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Самосделка".				
Разрез Д-765				
A1, 0–12	58.37 ± 1.39	3.95 ± 0.30	10.88 ± 1.36	1478
B1, 12–35	5.78 ± 0.22	0.54 ± 0.05	5.58 ± 0.41	1070
B2, 35–50	5.24 ± 0.12	0.49 ± 0.04	3.66 ± 0.54	1069
Западная граница зоны распространения бугров Бэра. Ключевой участок "Хулхута".				
Разрез Д-766				
A1, 0–10	53.74 ± 1.85	5.99 ± 0.49	118.52 ± 4.10	897
B1, 10–22	5.89 ± 0.08	0.90 ± 0.11	3.47 ± 0.43	654
B2ca, 22–44	4.77 ± 0.12	0.85 ± 0.04	3.71 ± 0.36	561

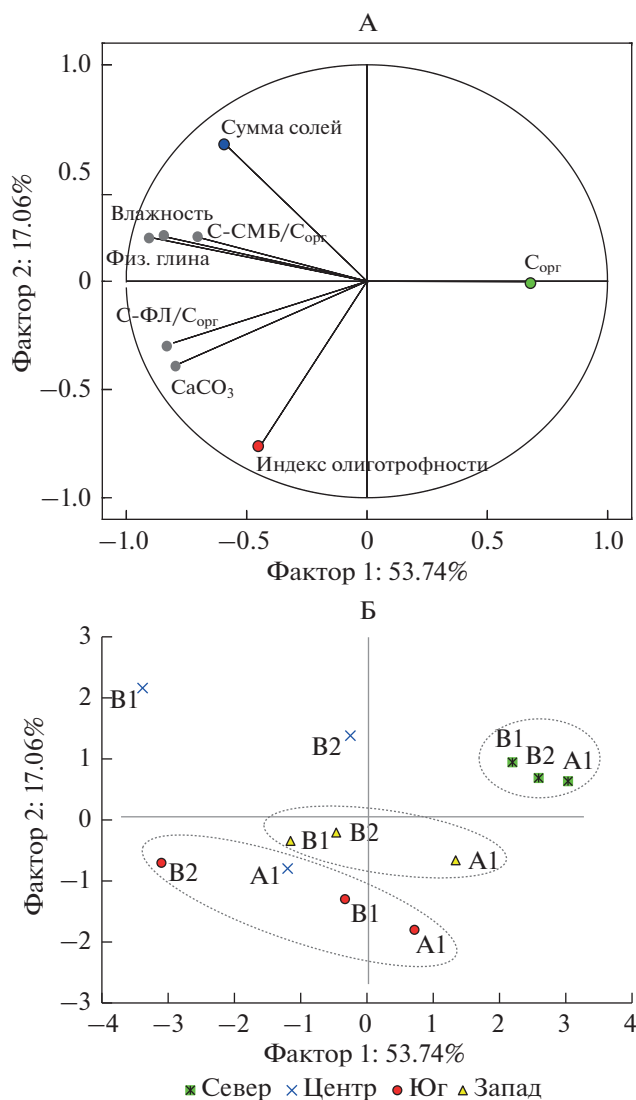


Рис. 2. Проекция физико-химических и микробиологических характеристик (I) и диаграмма рассеяния верхних горизонтов бурых полупустынных почв бугров Бэра (II) на факторной плоскости.

нистой почве в центральной части зоны распространения бугров Бэра (ключевой участок “Линейное”) и наиболее аридной песчаной почве на западной границе их распространения (ключевой участок “Хулхута”) индексы олиготрофности имели близкие значения. При этом численность КОЕ грибов, растущих на среде Чапека, на ключевом участке “Хулхута” была в 15 раз больше, чем на ключевом участке “Линейное”.

Статистический анализ данных. Для выявления комплексных различий между бурыми полупустынными почвами на буграх Бэра, рассматривали ряд физико-химических и микробиологических показателей. На факторной плоскости (рис. 2, А) увеличение координаты по фактору 1 было связано с увеличением содержания органического уг-

лерода почвы; уменьшение по фактору 1 и увеличение по фактору 2 – с ростом содержания физической глины, влажности, засоленности и доли суммарной биомассы в органическом углероде почвы; уменьшение координат по двум факторам – с ростом индекса олиготрофности, содержания карбонатов и доли живой микробной биомассы в органическом углероде почвы.

На диаграмме рассеяния (рис. 2, Б) отдельно группировались три горизонта незасоленной почвы в северной части зоны распространения бугров Бэра. Здесь определяющими показателями были высокое содержание органического углерода и низкий индекс олиготрофности. Бурая полупустынная почва в южной части зоны распространения бугров Бэра (ключевой участок “Самосделка”) характеризовалась максимальными значениями индекса олиготрофности. Близкое расположение факторных координат почвенных профилей западного и южного участков было связано с близкими величинами содержания органического углерода и сходным гранулометрическим составом. В центральной части зоны распространения бугров Бэра (ключевой участок “Линейное”), верхний горизонт бурой полупустынной почвы отличался тяжелым гранулометрическим составом и высокой засоленностью, а также повышенным индексом олиготрофности микробного сообщества. Именно здесь была выявлена максимальная доля углерода живых микробных клеток в органическом углероде почв.

Бурые полупустынные почвы бугров Бэра среди других аридных почв. Для сравнения бурых полупустынных почв Бэровских бугров со светлокаштановыми почвами и солонцами, а также с каштановидными эродированными почвами, погребенными под курганами эпохи бронзы во время палеоэкологического кризиса [11, 36, 42], строили диаграммы box plot, используя ранее полученные данные [6–11]. Величины суммарной микробной биомассы (рис. 3) в бурых полупустынных почвах бугров Бэра варьировали от 370 до 700 мкг С/г почвы в горизонтах А1 и от 430 до 600 мкг С/г почвы в горизонтах В1, на уровне минимальных значений данного показателя в солонцах и каштановидных почвах, и в 3.5–4 раза ниже, чем средние значения в каштановых почвах. Биомасса живых микробных клеток С-ФЛ бурых полупустынных почв в горизонтах А1 и В1 составляла 150–320 и 50–100 мкг С/г почвы. В горизонтах А1 эти значения были сходны с минимальными величинами в современных каштановых почвах и солонцах, а в горизонтах В1 они были в 4–7 раз меньше.

По суммарной микробной биомассе бурые полупустынные почвы бугров Бэра были сравнимы с каштановидными палеопочвами суббореального ксеротерма рубежа III–II тыс. до н. э., однако

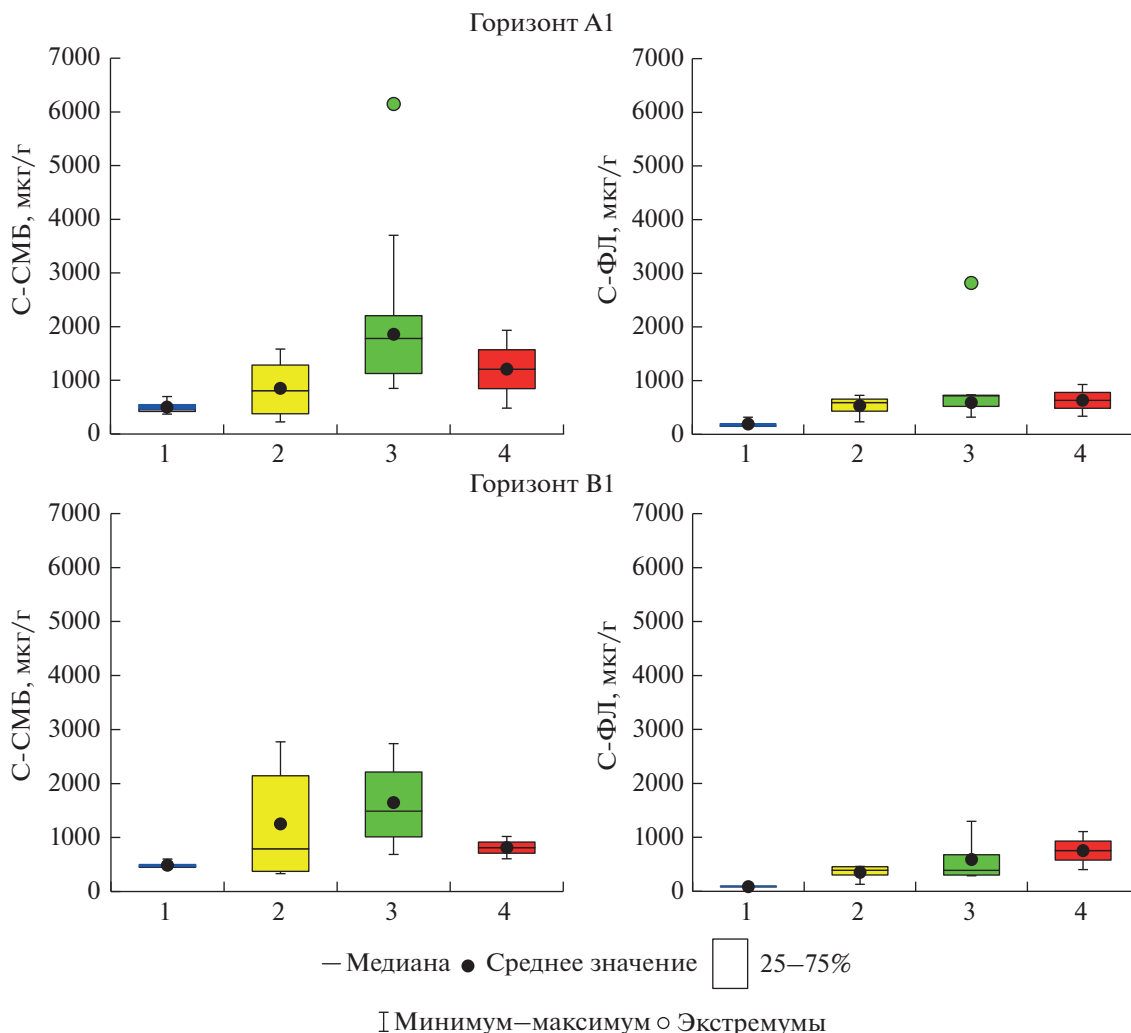


Рис. 3. Суммарная микробная биомасса С-СМБ и биомасса живых микробных клеток С-ФЛ в верхних горизонтах степных и пустынно-степных почв: 1 – бурые полупустынные почвы бугров Бэра, ($n = 4$); 2 – каштановые солонцы, ($n = 6$); 3 – каштановые и светло-каштановые почвы: ($n_{(C-SMB)} = 8, n_{(C-FL)} = 4$); 4 – каштановидные полупустынные почвы III–II тыс. до н. э. ($n = 2$).

биомасса живых микробных клеток в каштановидных почвах была в 6–9 раз больше, несмотря на длительное время погребения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бурых полупустынных почвах наиболее засушливых участков, расположенных на южной и западной границе зоны распространения бугров Бэра, содержание органического углерода было в 1.5–2 раза меньше по сравнению с почвой на северной границе зоны их распространения.

Наибольший индекс олиготрофности микробного сообщества, указывающий на высокую долю микроорганизмов, максимально приспособленных к засушливым условиям, отмечен в почвенном профиле южного ключевого участка.

Изменчивость суммарной и живой микробной биомассы в бурых полупустынных почвах бугров Бэра преимущественно связана с гранулометрическим составом. В верхнем горизонте величины данных показателей в глинистой почве были в 1.5–2 раза выше, чем в песчаных почвах.

Сравнение значений микробной биомассы в верхних горизонтах бурых полупустынных почв бугров Бэра с верхними горизонтами каштановых почв и солонцов показало, что суммарная микробная биомасса в бурых полупустынных почвах в 3.5–4 раза меньше, чем в каштановых почвах, и варьировала на уровне минимальных значений в солонцах. Биомасса живых микробных клеток в верхнем горизонте бурых полупустынных почв была сравнима с ее минимальными значениями в верхнем горизонте современных каштановых почв и солонцов.

Каштановидные палеопочвы суббореального ксеротерма рубежа III–II тыс. до н. э., которые, как предполагалось ранее, можно рассматривать в качестве аналогов бурых полупустынных почв бугров Бэра, только по суммарной биомассе были сравнимы с ними. При этом биомасса живых микробных клеток в каштановидных палеопочвах была в 6–9 раз больше, чем в бурых полупустынных почвах, и варьировала на уровне современных каштановых почв и солонцов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект 19-18-00406. Полевые экспедиционные исследования проводили в соответствии с госзаданием 0191-2019-0046.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 490 с.
2. *Бадюкова Е.Н.* Новые данные о морфологии и строении Бэровских бугров // *Геоморфология*. № 4. 2005. С. 25–38. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2005-4-25-38>
3. *Безродных Ю.П., Делия С.В., Романюк Б.Ф., Федоров В.И., Сорокин В.М., Лукша В.Л.* Мангышлакские отложения (голоцен) Северного Каспия // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2014. № 4. С. 88–108. <https://doi.org/10.7868/S0869592X14040036>
4. *Бэр К.М.* Ученые заметки о Каспийском море и его окрестностях // *Записки императорского русского географического общества* / Под ред. Ерофеева В.Г. СПб.: Типография Императ. АН, 1856. Кн. XI. С. 181–224.
5. *Головачев И.В.* О буграх Бэра и их происхождении // *Геология, география и глобальная энергия*. 2017. № 4. С. 139–149.
6. *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.
7. *Демкин В.А., Золотарева Б.Н., Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Каширская Н.Н., Ельцов М.В., Удальцов С.Н.* Динамика свойств степных палеопочв сарматского времени (II в. до н. э.–IV в. н. э.) в связи с вековой изменчивостью увлажненности климата // *Почвоведение*. 2012. № 2. С. 142–155.
8. *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.
9. *Демкина Т.С., Борисов А.В., Ельцов М.В., Демкин В.А.* Сравнительная характеристика микробных сообществ курганных насыпей, подкурганных и современных почв степной зоны Нижнего Поволжья // *Почвоведение*. 2007. № 6. С. 738–748.
10. *Демкина Т.С., Попова И.В., Демкин В.А.* Характеристика микробных сообществ современных и подкурганных почв солонцовых комплексов сухих степей Нижнего Поволжья // *Почвоведение*. 2013. № 7. С. 840–849.
11. *Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Каширская Н.Н., Стретович И.В., Демкин В.А.* Характеристика микробных сообществ степных подкурганных палеопочв Сарматского времени (I–IV вв. н. э.) // *Почвоведение*. 2009. № 7. С. 836–846.
12. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 320 с.
13. *Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М., Степанов А.Л., Лихачева А.А., Манучарова Н.А.* Практикум по биологии почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 120 с.
14. *Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б.* Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // *Известия РАН. Сер. географическая*. 2020. № 2. С. 207–217. <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
15. *Казеев К.Ш., Кузнецова Ю.С.* Эколого-биологические особенности аридных почв Прикаспийской низменности // *Естественные науки*. 2010. № 5. С. 83–85.
16. *Каширская Н.Н., Плеханова Л.Н., Чернышева Е.В., Ельцов М.В., Удальцов С.Н., Борисов А.В.* Пространственно-временные особенности фосфатной активности естественных и антропогенно-преобразованных почв // *Почвоведение*. 2020. № 1. С. 89–101.
17. *Каширская Н.Н., Хомутова Т.Э., Демкина Т.С., Демкин В.А.* Микробная биомасса подкурганных и современных почв степной зоны Нижнего Поволжья // *Почвоведение*. 2009. № 5. С. 581–587.
18. *Классификация и диагностика почв СССР*. М.: Колос, 1977. 221 с.
19. *Ковда В.А.* Почвы дельты Волги и их место в почвообразовании // *Тр. гос. океанографического ин-та*. 1951. Вып. 18/30. С. 5–43.
20. *Коротаев В.Н.* Геоморфология дельты Волги и динамика русловых разветвлений // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география*. 2011. № 2. С. 103–109.
21. *Коротаев В.Н., Рычагов Г.И., Римский-Корсаков Н.А. и др.* Атлас дельты Волги: геоморфология, русловая и береговая морфодинамика. М., 2015. 128 с.
22. *Куст Г.С., Андреева О.В., Лобковский В.А.* Нейтральный баланс деградации земель – современный подход к исследованию засушливых регионов на национальном уровне // *Аридные экосистемы*. 2020. Т. 26. № 2. С. 3–9.
23. *Лубсанова Д.А., Зенова Г.М., Кожевин П.А., Манучарова Н.А., Шваров А.П.* Мицелиальные актинобактерии засоленных почв аридных территорий // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение*. 2014. № 2. С. 44–48.
24. *Маслова Е.А., Сумина Д.Е., Стрелков С.П., Сорокин А.П.* Мониторинг и оценка разрушения бугров Бэра на территории Астраханской области при помощи анализа геоинформационных данных //

- Астраханский вестник экологического образования. 2018. № 3. С. 47–51.
25. Мельникова О.Н., Показеев К.В. Гипотеза формирования “бугров Бэра” нелинейными волнами при внезапном понижении уровня каспийского моря // Известия РАН. Сер. физическая. 2020. № 1. С. 101–105.
<https://doi.org/10.31857/S0367676520010238>
26. Пищухина Е.Ю., Сопрунова О.Б., Сальникова Н.А. Физико-химические свойства и особенности микрофлоры почв Бэровских бугров урбанизированных территорий // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 4. С. 114–116.
27. Плеханова Л.Н. Антропогенная деградация почв речных террас Волго-Уральского региона в эпоху бронзы и ее влияние на современный почвенно-растительный покров // Аридные экосистемы. 2019. № 3. С. 53–59.
28. Плеханова Л.Н. Проблемы поиска эталонных почв Степного Зауралья для создания Красной книги почв // Аридные экосистемы. 2017. № 3. С. 50–58.
29. Рычагов Г.И. Новые данные о генезисе и возрасте Бэровских бугров // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2009. № 5. С. 59–68.
30. Свиточ А.А., Ключиткина Т.С. Происхождение Бэровских бугров // Геоморфология. 2008. № 1. С. 72–87.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2008-1-72-86>
31. Свиточ А.А., Ключиткина Т.С. Бэровские бугры Нижнего Поволжья. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 159 с.
32. Свиточ А.А., Ключиткина Т.С. Бэровские бугры Нижнего Поволжья: морфология, распространение и строение // Геоморфология. 2007. № 3. С. 92–105.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2007-3-92-105>
33. Свиточ А.А., Макшаев Р.Р., Ростовцева Ю.В., Ключиткина Т.С., Березнер О.С., Трегуб Т.Ф., Хомченко Д.С. Шоколадные глины Северного Прикаспия. М.: Географический факультет МГУ, 2017. 140 с.
34. Федотова А.В., Стрелков С.П., Сорокин А.П., Кондрашин К.Г. Сравнительный анализ состояния почвенного покрова антропогенно-нарушенных ландшафтов бугров Бэра // Естественные науки. 2011. № 1. С. 67–77.
35. Хомутова Т.Э., Демкина Т.С., Демкин В.А. Оценка суммарной и активной микробной биомассы разновозрастных подкурганых палеопочв // Микробиология. 2004. № 2. С. 241–247.
36. Хомутова Т.Э., Демкина Т.С., Борисов А.В., Шишлина Н.И. Состояние микробных сообществ подкурганых 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.
37. Хомутова Т.Э., Каширская Н.Н., Демкин В.А. Оценка живой и суммарной биомассы микробных сообществ современной каштановой почвы и подкурганых палеопочв // Почвоведение. 2011. № 12. С. 1496–1503.
38. Шалдыбин М.В., Шеин Е.В., Харитонов Г.В., Дембовецкий А.В., Манучаров А.С., Лопушняк Ю.М., Коновалова Н.С. Минералогический состав почв Бэровских бугров юга Астраханской области // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2015. № 1. С. 3–12.
39. Шеин Е.В., Харитонов Г.В., Милановский Е.Ю., Дембовецкий А.В., Федотова А.В., Коновалова Н.С., Сиротский С.Е., Первова Н.Е. Агрегатообразование в засоленных почвах ландшафтов бугров Бэра // Почвоведение. 2013. № 4. С. 442–453.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X13040126>
40. Akbari M., Modarres R., Noughani M.A. Assessing early warning for desertification hazard based on E-SMART indicators in arid regions of northeastern Iran // J. Arid Environ. 2020. V. 174. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104086>
41. Kharchenko S., Kazakov S., Bolysov S. The spectral fingerprints of topographical pattern of the Near-Caspian “Baer’s mounds” territory and automatic search of similar landform regions in the world // Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. Sofia. 2018. V. 18. P. 659.
<https://doi.org/10.5593/sgem2018/2.3/S11.083>
42. Khomutova T., Kashirskaia 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 // Quater. Int. 2019. V. 507. P. 84–94.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.02.013>
43. Krzywinski M., Altman N. Visualizing samples with box plots // Nature Methods. 2014. № 2. P. 119–120.
<https://doi.org/10.1038/nmeth.2813>
44. Macías M.J.G., Carbajal N., Vargas J.T. Soil deterioration in the southern Chihuahuan Desert caused by agricultural practices and meteorological events // J. Arid Environ. 2020. V. 176. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104097>
45. Mel’nikova O.N., Pokazeev K.V. The Formation of the “Baer Hillocks” by the Peak Water Flow at a Sharp Reduction of the Caspian Sea Level // Processes in GeoMedia. Part of the Springer Geology book series. 2020. V. 1. P. 1–9.
46. Fedotova A.V., Sorokin A.P., Strelkov S.P., Popova E.A. Biospheric role of Baer’s hillocks in conservation of biodiversity of the Volga delta // Mat of the international conference with elements of the scientific school for youth “Ecoculture and phyto-biotechnology improving the quality of life in the Caspian”. Astrakhan, December 7–10, 2010. P. 168–171.
47. Emurotu M.O., Anyanwu C.U. Effect of atrazine and butachlor on some soil enzymes activities at different concentrations // Eur. J. Experim. Biol. 2016. № 6. P. 9–15.
48. 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. P. 405–414.
49. Prince S.D., Podwojewski P. Desertification: Inappropriate images lead to inappropriate actions // Land Degradation and Development. 2020. V. 31. P. 677–682.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3436>

The Biological Activity of the Haplic Calcisols of the Baer's Hillocks

N. N. Kashirskaya^{1,*}, T. S. Demkina¹, T. E. Khomutova¹, M. V. Eltsov¹, S. N. Udaltsov¹,
T. V. Kuznetsova¹, and I. A. Idrisov²

¹*Institute of Physicochemical and Biological problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia*

²*Institute of Geology, Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, 367030 Russia*

*e-mail: nkashirskaya81@gmail.com

The biological activity was evaluated for Eutric Cambisols (Loamic, Protocalcic) of the Baer Hills of Astrakhan oblast formed under different hydrothermic conditions and characterized by different particle-size distributions. The organic carbon content, total microbial biomass, biomass of living microbial cells, and oligotrophy index of microbial communities were determined. The organic carbon content in soils of more arid southern and western parts of the Baer Hills area is 1.5–2 times lower than that in soils of the northern part. The highest oligotrophy index of the microbial community has been found in the soil profile in the southern part of the Baer Hills area. The variability of total and live microbial biomass depends on the soil texture, especially in the upper horizon, where the values of these indicators in clayey soils are 1.5–2 times higher than in sandy soils. The indicators of total and live microbial biomass in Eutric Cambisols of the Baer Hills are lower than in those in Haplic Kastanozems, Cambisols, Calcisols, and Solonetztes. Eutric Cambisols of the Baer Hills and eroded Kastanozem-like paleosols of the Subboreal xerothermic period (3rd–2nd millennia BC) are characterized by close values of the total microbial biomass, whereas the biomass of living microbial cells in eroded Kastanozem-like paleosols is 6–9 times higher than that in modern Eutric Cambisols of the Baer Hills and varies at the levels typical of modern Calcisols and Solonetztes.

Keywords: climate, particle-size distribution, total microbial biomass, biomass of living microbial cells