

УДК 504.53

**СВОЙСТВА ПОЧВ И ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ  
АРИДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПОБЕРЕЖЬЯ ОАЗИСА В ЮГО-ВОСТОЧНОМ ТУНИСЕ**

© 2023 г. Б. Абделхаким\*, О. Зохра\*, Е. Виссем\*, Б. Надхем\*\*

*\*Университет Габеса, научный факультет*

*Тунисская Республика, 6072, г. Габес, район Эрриад, Зриг. E-mail: bouajilaabdelhakim@gmail.com*

*\*\*Тунисский университет Эль Манара, факультет наук Туниса*

*Тунисская Республика, 2092, г. Тунис, кампус Фархат Хачед*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 10.01.2023. Принята к публикации 13.01.2023.

Знания о свойствах почв и запасах органического углерода в них в условиях аридных экосистем крайне важны для оптимизации связывания углерода с целью смягчить последствия климатических изменений. Наше исследование направлено на изучение свойств почвы, пулов и запасов почвенного органического углерода в аридной экосистеме оазиса. Почвенные образцы были отобраны случайным образом с глубин 0-5 и 0-30 см на 17 участках (всего 34 образца). В них мы измерили объемную плотность, рН, электропроводность, содержание карбоната кальция и гипса. Также мы определили общий объем почвенного углерода, частицы органического углерода, а также наличие углерода, связанного с концентрациями в почве мелких минеральных включений и запасов. Результаты показали высокие значения рН и электропроводности оазисных почв. Аналогичным образом на исследованных участках мы зафиксировали высокое количество  $\text{CaCO}_3$  и гипса. Значения объемной плотности колебались от 1.23 до 1.30 г/см<sup>3</sup> на глубине 0-5 см и от 1.18 до 1.35 г/см<sup>3</sup> на глубине 0-30 см. Общие концентрации углерода в среднем колебались от 8.47 до 13.25 г/кг и от 9.27 до 11.06 г/кг по двум слоям соответственно. Неразлагаемый углерод образовывал пулы по всех слоях (> 60%). Запасы углерода на участках в слое 0-5 см составили 0.4-0.8 кгС/м<sup>2</sup>, а в слое 0-30 см достигали 4 кгС/м<sup>2</sup> (40 т/га). Запасы твердых частиц органического углерода составили 21-34%. Матрица корреляции для свойств почвы показала значительную отрицательную корреляцию ( $p = 0.05$ ) между частицами углерода и электропроводностью. Однако запасы углерода сильно и положительно коррелируют ( $p = 0.01$ ) с углеродными пулами. Таким образом, можно утверждать, что почвы оазиса содержат в себе относительно большое количество органического углерода. А значит, данное исследование подтверждает, что аридные почвы Северной Африки можно рассматривать как потенциальный поглотитель для связывания и удержания органического углерода.

*Ключевые слова:* органический углерод, гипсоносные почвы, аридные регионы, Тунис.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-53-66**

**EDN: LOEVRN**

Органический углерод в почвах играет важную роль в круговороте углерода в наземных экосистемах в целом (Yigini, Panagos, 2016). Однако его динамика в почвах зависит от климатических изменений, а также изменения растительного покрова или режимов землепользования. J. Albaladejo с соавторами (2013) указывали, что четкое описание распределения и трансформации органического углерода и влияющих на него факторов поможет предсказать последствия климатических изменений. В полуаридных и аридных регионах углерод крайне чувствителен к изменениям окружающей среды, особенно растительного покрова (Wang et al., 2011), и его содержание составляет < 0.5% (Lal, 2002). Более того, эти экосистемы сталкиваются с такими экологическими угрозами, как снижение органических веществ в почвах, засоление, эрозия и опустынивание (Brahim et al., 2021), снижающие плодородие почв и их способность накапливать углерод.

В последние годы все больше внимания уделяют проблеме круговорота органического углерода в почвах и изоляции в них органических пулов. Органический углерод является основным компонентом глобального углеродного цикла (Munoz-Rojas et al., 2012), поскольку действует как

источник или поглотитель диоксида углерода из атмосферы. Улучшение способов для изоляции углерода в почве и сокращение его выбросов – это основные стратегии, необходимые для контроля концентрации парниковых газов в атмосфере. Именно поэтому странам всего мира следует регулярно отчитываться о запасах органического углерода в почвах (Brahim et al., 2014), а также информировать о текущих запасах углерода в целом. Также изменения необходимы в Рамочной конвенции ООН об изменении климата (United Nations Framework Convention for Climate Change – UNFCCC; Batjes, 2002). Кроме того, в соответствии с UNFCCC, страны должны предоставлять кадастры выбросов и поглотителей парниковых газов, а в контексте сельского и лесного хозяйств – оценки запасов углерода в почве (Batjes, 2002). Для получения точных оценок требуется высокая плотность точек, где проводится отбор почвенных проб (Liebens, van Molle, 2003), потому что, как показали некоторые исследования, углеродные запасы сильно зависят от типа землепользования, свойств и типов почв (Pandey et al., 2010), а значит, важно изучать влияние землепользования и типов почв в различных условиях окружающей среды на изоляцию углерода, и особенно – в почвах аридных регионов.

Несколько исследований показали, что аридные почвы, превращенные в сельскохозяйственные угодья и в оазисные территории, могут накапливать довольно большие запасы органического углерода в аридном климате: например, почвы континентального оазиса Кебели в Тунисе (Omar et al., 2017). P. Mlih с соавторами (2019) показали, что концентрация углерода в почвах оазиса Шенини в Габесе выше, чем в соседних некультивируемых почвах. Согласно С. Li с соавторами (2019), после многолетней мелиорации формирование оазисов привело к увеличению содержания органического углерода и питательных веществ в почвах по сравнению с таковым в соседней пустыне. H. Elbasiouny с соавторами (2017) доказали, что использование для сельского хозяйства прибрежных земель в северной части дельты р. Нил гораздо лучше изолирует углерод и азот в почве. Авторы считают, что это может стать верным подходом для дальнейшего смягчения последствий климатических изменений. В недавней своей работе E. Xu с соавторами (2020) показали, что аридный регион Северо-Западного Китая может быть потенциальным поглотителем почвенного углерода. Пустынный оазис – это микроклимат, где уровень влажности, тепла и света благоприятен для оптимального выращивания в регионе с нехваткой плодородных почв таких культур, как апельсин, гранаты, овощи, кормовые культуры и злаки (Mlih et al., 2016). Превращение аридных земель в оазисы может играть большую роль для экосистем за счет развития сельского хозяйства (Zhang et al., 2017).

Прибрежный оазис в Габесе представляет собой особую аридную экосистему, которая играет большую роль в обеспечении продовольствием местного населения и увеличении природных ресурсов аридных почв. Стабильный контроль таких оазисов исключительно важен для экономического развития и социального благосостояния региона, а также для экологии в контексте климатических изменений. Наше исследование направлено на то, чтобы подчеркнуть важность сохранения прибрежных сельскохозяйственных систем в оазисе на юге Туниса, т.к. это необходимо для улучшения связывания органического углерода в аридных почвах. А потому мы поощряем правительство развивать и продвигать сельскохозяйственную деятельность для обеспечения устойчивой продовольственной безопасности, биоразнообразия и ресурсов.

### Материалы и методы

*Территория исследования.* Работа проводилась на побережье оазиса в Габесе, на юго-востоке Тунисской Республики (рис. 1). Климат в этом регионе сухой средиземноморский, особенно жаркий летом и мягкий зимой. Средние годовые осадки составляют 185 мм, а средняя годовая температура – 22.5°C, индекс аридности – 0.12 (UNEP, 1997). Финиковая пальма (*Phoenix dactylifera* L.) является доминирующим древесным видом этого оазиса, однако помимо нее здесь произрастают такие фруктовые деревья, как гранат (*Punica granatum* L.), фига (*Ficus carica* L.), виноград (*Vitis* spp.) и садовые культуры. Почвы в отобранных образцах (Pouget, 1965) оказались гипсоносными и были проклассифицированы как цементированные карбонатные (Petric Calcisols), цементированные гипсовые (Petric Gypsisols), гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks) и насыщенные слаборазвитые (Eutric Regosols) почвы (IUSS ..., 2015). Образцы были взяты с глубин 0-5 и 0-30 см, высушены на воздухе и просеяны через сито с ячейками размером 2 мм.

*Анализ почвенных свойств.* В насыщенной вытяжке (McLean, 1982) и почвенной пасте, насыщенной водой, мы измерили pH и электропроводность почв. Содержание карбонатов оценивали

кальциметром (Nelson, 1982), содержание гипса определяли, обрабатывая образцы карбонатом аммония и осаждением хлоридом бария (Vieillefon, 1979). Гранулометрический состав почв не оценивали, потому что до сих пор не разработан метод, который можно было бы использовать для точной оценки распределения частиц по размерам, а также для классификации гипсоносных почв по текстуре для верной интерпретации физических реакций, а большинство лабораторных методов включает предварительную обработку, которая удаляет гипс из образцов. Поэтому результаты распределения частиц по размерам не отражают распределения по размерам всей почвы (Suliman, Sallam, 2016). Мы использовали метод цилиндрического керна для определения объемной плотности, которая вычисляется по следующей формуле: масса сухого грунта/объем цилиндра.

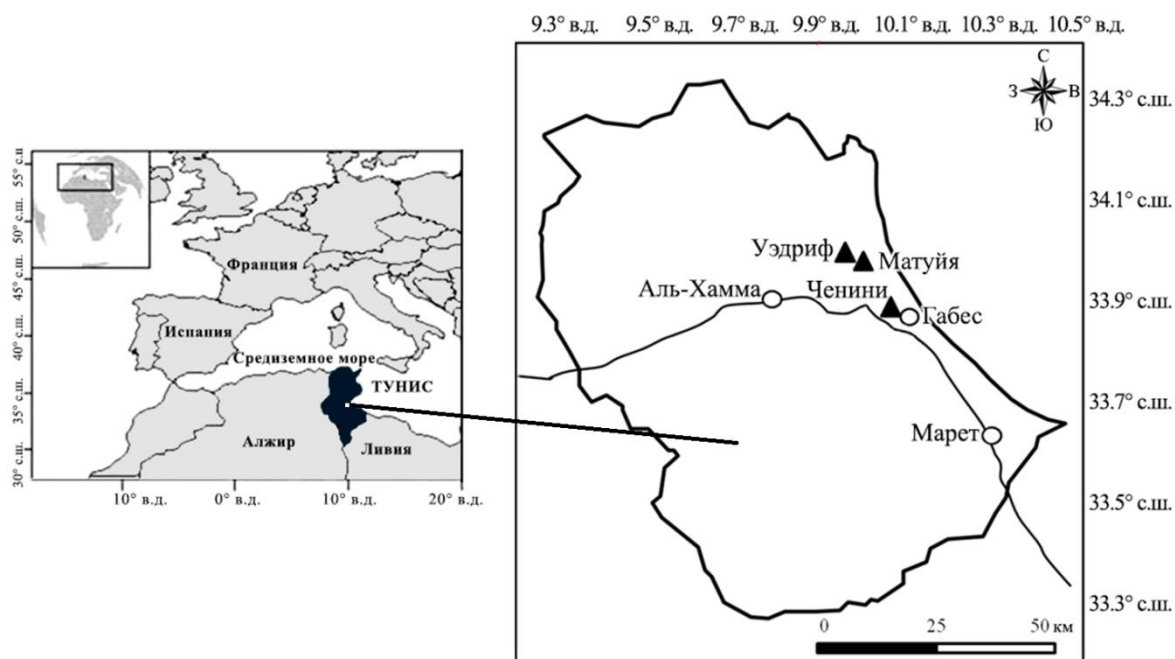


Рис. 1. Расположение изучаемого региона и площадок.

Метод окисления  $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$  Уолкли-Блэка (Nelson, Sommers, 1982) использован для измерения органического углерода в почвах. Твердые частицы углерода определяли с помощью метода Камбарделлы-Эллиота (Cambardella, Elliot, 1992), который заключается в диспергировании почвы в гексаметафосфате натрия в концентрации 5 г/л и отделении твердых частиц от почвы путем просеивания. Затем массу пропускают через сито с ячейками в 53 мкм, а взвесь сушат и анализируют на наличие органического углерода. Значения твердых частиц выражены для насыпного грунта; они оцениваются в массе, оставшейся в сите, а затем пересчитываются в г/кг в насыпном грунте. Согласно недавним исследованиям, общее количество органического углерода в почве – это сумма различных пропорций органических почвенных фракций (Wiesmeier et al., 2014). В почвах Туниса за счет мелкодисперсных минеральных включений преобладают органический углерод и его твердые частицы (Bouajila, Gallali, 2010). Следовательно, если принять во внимание крупнозернистость (крупные обломки, в гранулометрическом составе которых преобладает (77-88%) мелкий и очень мелкий песок) и крайне низкое содержание почвенных макро- и микроагрегатов в исследованных почвах, неразлагаемый органический углерод должен оцениваться по следующей формуле: неразлагаемый органический углерод = сумма органического углерода – твердые частицы органического углерода (все выражено в г/кг).

Запасы органического углерода в почве для определенной глубины мы оценивали по следующей формуле (Brahim et al., 2014; Yigini, Panagos, 2016): запасы органического углерода (тС/га или  $kgC/m^2$ ) = содержание углерода (%) · объемная плотность ( $г/см^3$ ) · глубина (см).

*Статистический анализ.* Мы провели различные статистические тесты и анализ основных компонентов, чтобы изучить взаимосвязь между почвенными свойствами, углеродными пулами и

запасами в районе исследования, в частности, с помощью корреляций Пирсона ( $P = 0.01$ ,  $P = 0.05$ ). Статистические тесты выполнялись с использованием приложения XLSTAT для Excel.

### Результаты и обсуждение

*Свойства почв* в экосистемах оазиса очень похожи на свойства почв в регионе в целом. В отобранных образцах самое высокое среднее значение pH наблюдалось для насыщенных слаборазвитых почв (Eutric Regosols) –  $8.83 \pm 0.15$  на глубинах 0-5 и 0-30 см. Однако в цементированных карбонатных (Petric Calcisols), цементированных гипсовых (Petric Gypsisols) и гипсовых солончаках (Gypsic Solonchaks) pH сильно варьировал в обоих слоях. Коэффициенты вариации оказались очень низкими и не превышали 10% (табл. 1, 2).

В слое глубиной 0-5 см средние значения электропроводности составили для разных типов почв  $7.87 \pm 5.77$ ,  $15.71 \pm 6.67$ ,  $6.27 \pm 1.83$  и  $4.43 \pm 1.16$  мС/см соответственно. Однако в слое 0-30 см самые высокие значения ( $23.91 \pm 19.56$  мС/см) наблюдались только для солончаков, тогда как в почвах других типов она не превышала 12 мС/см. Коэффициент вариации для электропроводности оказался особенно высоким в слое 0-5 см – 30-82%. Объемная плотность в среднем варьировала от  $1.16 \pm 0.10$  до  $1.30 \pm 0.17$  г/см<sup>3</sup> в слое 0-5 см и от  $1.18 \pm 0.11$  до  $1.35 \pm 0.07$  г/см<sup>3</sup> в слое 0-30 см. Коэффициент вариации для объемной плотности был очень низким для всех типов почв и слоев и не превышал 14%. Содержание карбоната кальция варьировало от 62 до 113 г/кг в слое 0-5 см и от 67 до 105 г/кг в слое 0-30 см. Самая высокая концентрация CaCO<sub>3</sub> – в насыщенных слаборазвитых почвах (Eutric Regosols) в слое 0-5 см и в гипсовых солончаках (Gypsic Solonchaks) в слое 0-30 см. Содержание гипса также сильно менялось в разных почвах и слоях: в верхнем 5-сантиметровом оно варьировало от 51.33 до 275 г/кг, в 30-сантиметровом – от 59.33 до 291.3 г/кг (табл. 1, 2). Самое высокое содержание гипса на глубине 0-5 см (275.18 г/кг) и 0-30 см (291.3 г/кг) – в цементированных гипсовых почвах (Petric Gypsisols), а в насыщенных слаборазвитых (Eutric Regosols), наоборот, наименьшее. Коэффициент вариации был высоким как для карбоната кальция, так и для гипса (табл. 1, 2).

В целом, можно утверждать, что в оазисных экосистемах Габеса почвы щелочные, засоленные, с высоким содержанием гипса и карбоната кальция. Как и в работе J.L. Smith и J.W. Doran (1996), цементированные карбонатные (Petric Calcisols) и насыщенные слаборазвитые (Eutric Regosols) почвы оказались умеренно засоленными ( $4 \text{ дС/м} < \text{электропроводность} < 8 \text{ дС/м}$ ), цементированные гипсовые (Petric Gypsisols) – сильно засоленными ( $8 \text{ дС/м} < \text{электропроводность} < 16 \text{ дС/м}$ ), а гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks) – очень сильно засоленными (электропроводность  $> 16 \text{ дС/м}$ ).

*Концентрации пулов органического углерода в почвах.* Результаты исследований показали (табл. 3), что в среднем у цементированных гипсовых почв (Petric Gypsisols) – самое высокое содержание органического углерода ( $13.25 \pm 1.4$  г/кг), в то время как самое низкое ( $8.47 \pm 4.65$  г/кг) было обнаружено у насыщенных слаборазвитых почв (Eutric Regosols); коэффициент вариации варьировал от 10% до 54%. Однако в слое 0-30 см концентрации запасов углерода составили  $9.27 \pm 2.1$  и  $11.06 \pm 4.53$  г/кг соответственно. Значения содержания углерода в почвах показали высокое непостоянство (коэффициент вариации  $> 20\%$ ), возможно, по причине разных химических и физических факторов в составе органического вещества на поверхности почвы. Как показано в таблице 3, самая высокая средняя концентрация твердых частиц углерода в слое 0-5 см наблюдалась в цементированных карбонатных почвах (Petric Calcisols), где она составила  $3.38 \pm 1.91$  г/кг, с чуть более низким значением у цементированных гипсовых почв (Petric Gypsisols) –  $2.87 \pm 1.14$  г/кг при коэффициенте вариации  $> 39\%$ .

Однако на глубине 0-30 см концентрация твердых частиц органического углерода составила  $2.1-33.6$  г/кг с коэффициентом вариации 31-55%. Как и органический углерод, содержание его твердых частиц сильно варьировало для каждого типа почвы как в обоих слоях. Неразлагаемый углерод был назван «рекальцитрантным пулом» общего органического углерода в почве (Hassink et al., 1997), потому что он зависит от таких мелких включений, как глина и известь. Неразлагаемые концентрации в слое 0-5 см располагались в следующем порядке: цементированные гипсовые почвы (Petric Gypsisols)  $>$  цементированные карбонатные почвы (Petric Calcisols)  $>$  насыщенные слаборазвитые почвы (Eutric Regosols)  $>$  гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks). Наибольшее зарегистрированное значение неразлагаемого углерода –  $10.38 \pm 1.39$  г/кг (табл. 3). В слое 0-30 см значения мало различались между типами почв и составили от  $6.97 \pm 1.05$  до  $8.34 \pm 3.47$  г/кг.

Коэффициент вариации неразлагаемого углерода сильно различался между типами почв, варьируя от 13 до 59%.

**Таблица 1.** Проанализированные свойства почв в изучаемом регионе: pH, электропроводность, объемная плотность, содержание гипса и карбоната кальция в слое 0-5 см.

Площадки отбора проб	Координаты площадок отбора проб	pH	Электропроводность, мС/см	Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>	Гипс, г/кг	CaCO <sub>3</sub> , г/кг
<b>Цементированные карбонатные почвы (Petric calcisols)</b>						
S1	33° 51' 53.88" с.ш., 10° 04' 10.10" в.д.	7.62	4.58	1.27	18.70	105.90
S2	33° 53' 53.66" с.ш., 10° 03' 37.22" в.д.	7.75	3.76	1.21	228.30	59.30
S3	33° 53' 51.90" с.ш., 10° 04' 9.73" в.д.	7.86	8.98	1.13	365.00	80.50
S4	33° 58' 09.24" с.ш., 10° 00' 42.61" в.д.	8.30	4.54	1.26	132.80	72.00
S5	33° 57' 54.66" с.ш., 10° 01' 28.60" в.д.	9.48	17.51	1.34	333.90	8.40
Среднее значение		8.20	07.87	1.24	215.74	65.22
Стандартное отклонение		0.76	5.77	0.08	143.27	36.05
Коэффициент уплотнения, %		9.25	73.22	6.27	66.41	55.27
<b>Цементированные гипсовые почвы (Petric Gypsisols)</b>						
S1	33° 57' 42.86" с.ш., 10° 03' 31.16" в.д.	7.80	6.53	1.32	227.30	110.10
S2	33° 57' 54.00" с.ш., 10° 00' 35.88" в.д.	9.16	21.6	1.52	241.30	51.50
S3	33° 57' 56.79" с.ш., 09° 59' 54.20" в.д.	9.09	15.22	1.27	395.00	31.70
S4	33° 57' 59.02" с.ш., 09° 59' 31.17" в.д.	8.40	19.48	1.10	237.10	55.50
Среднее значение		8.61	15.71	1.30	275.18	62.20
Стандартное отклонение		0.64	6.67	0.17	80.10	33.59
Коэффициент вариации, %		7.44	42.45	13.27	29.11	54.00
<b>Гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks)</b>						
S1	33° 53' 0.69" с.ш., 10° 04' 12.34" в.д.	8.92	7.95	1.07	188.9	67.7
S2	33° 53' 43.47" с.ш., 10° 04' 53.13" в.д.	8.03	6.42	1.31	65.6	241.5
S3	33° 53' 46.19" с.ш., 10° 03' 48.18" в.д.	7.75	3.51	1.1	564.5	33.8
S4	33° 57' 17.80" с.ш., 10° 02' 26.72" в.д.	7.81	5.62	1.2	180	80.5
S5	33° 57' 23.01" с.ш., 10° 02' 35.18" в.д.	8.05	7.85	1.13	145.3	144
Среднее значение		8.11	6.27	1.16	228.86	113.50
Стандартное отклонение		0.47	1.83	0.10	193.83	81.93
Коэффициент вариации, %		5.80	29.17	8.24	84.69	72.19
<b>Насыщенные слаборазвитые почвы (Eutric Regosols)</b>						
S1	33° 52' 59.14" с.ш., 10° 04' 45.78" в.д.	8.81	4.33	1.17	24.30	161.00
S2	33° 57' 49.38" с.ш., 10° 01' 09.52" в.д.	8.49	3.33	1.30	89.20	93.20
S3	33° 57' 16.47" с.ш., 10° 02' 16.81" в.д.	9.09	5.64	1.21	40.50	55.00
Среднее значение		8.80	4.43	1.23	51.33	103.07
Стандартное отклонение		0.30	1.16	0.07	33.78	53.68
Коэффициент вариации, %		3.41	26.13	5.43	65.80	52.09

*Общие запасы органического углерода, твердых частиц и неразлагаемого углерода в почвах.* Результаты нашего исследования показали, что в среднем запасы в почве в слое 0-5 см колебались от 0.49 до 0.87 кгС/м<sup>2</sup> (или от 4.9 до 8.7 т/га; рис. 2). В цементированных карбонатных почвах (Petric Calcisols) углеродные запасы оказались самыми высокими. В слое 0-30 см цементированных гипсовых (Petric Gypsisols), насыщенных слаборазвитых (Eutric Regosols) и цементированных карбонатных (Petric Calcisols) почв и гипсовых солончаков (Gypsic Solonchaks) содержание твердых частиц углерода оказалось более низким: 3.58, 3.75, 3.90 и 4.01 кгС/м<sup>2</sup> соответственно (рис. 3). Запасы твердых частиц (без запасов неразлагаемого органического углерода) не превышали 0.20 кгС/м<sup>2</sup>

в слое 0-5 см и колебались между 0.8 и 1.3 кгС/м<sup>2</sup> в слое 0-30 см. У цементированных карбонатных почв (Petric Calcisols) в слое 0-30 см оказался самый высокий запас твердых частиц.

**Таблица 2.** Проанализированные свойства почв в изучаемом регионе: рН, электропроводность, объемная плотность, содержание гипса и карбоната кальция в слое 0-30 см.

Площадки отбора проб	рН	Электропроводность, мС/см	Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>	Гипс, г/кг	CaCO <sub>3</sub> , г/кг
<b>Цементированные карбонатные почвы (Petric calcisols)</b>					
S1	7.56	3.35	1.32	25.80	118.60
S2	7.72	8.68	1.02	178.50	63.50
S3	7.84	4.02	1.12	385.00	59.30
S4	9.22	5.37	1.28	107.70	80.50
S5	9.23	12.18	1.45	271.50	16.90
Среднее значение	8.31	6.72	1.24	193.70	67.76
Стандартное отклонение	0.84	3.68	0.17	140.06	36.82
Коэффициент вариации, %	10.07	54.738	13.69	72.31	54.34
<b>Цементированные гипсовые почвы (Petric Gypsisols)</b>					
S1	7.92	18.58	1.27	247.50	122.80
S2	9.28	10.79	1.40	227.20	67.40
S3	8.77	10.03	1.26	451.60	35.70
S4	8.47	11.61	1.21	239.10	55.50
Среднее значение	8.61	12.75	1.29	291.35	70.35
Стандартное отклонение	0.57	3.94	0.08	107.16	37.33
Коэффициент вариации, %	6.60	30.882	6.31	36.78	53.06
<b>Гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks)</b>					
S1	8.85	58.6	1.24	233.90	67.70
S2	8.03	18.45	1.02	143.90	228.80
S3	7.77	11.28	1.30	423.60	46.60
S4	7.72	15.14	1.23	178.50	59.30
S5	8.72	16.09	1.12	162.30	127.10
Среднее значение	8.22	23.91	1.18	228.44	105.90
Стандартное отклонение	0.53	19.56	0.11	114.16	75.33
Коэффициент вариации, %	6.48	81.81	9.43	49.98	71.14
<b>Насыщенные слаборазвитые почвы (Eutric Regosols)</b>					
S1	8.90	13.24	1.41	22.80	152.50
S2	8.66	3.14	1.27	125.00	55.00
S3	8.94	9.2	1.36	30.20	50.80
Среднее значение	8.83	8.53	1.35	59.33	86.10
Стандартное отклонение	0.15	5.08	0.07	56.99	57.54
Коэффициент вариации, %	1.71	59.619	5.27	96.05	66.83

*Почвенные свойства оазисных экосистем.* Значения рН показали, что почвы исследуемого района – щелочные. Сходные значения рН были установлены R. Mlih с соавторами (2019) и Z. Омар с соавторами (2020) в тех же регионах, что можно объяснить высоким содержанием солей, которые выделяются гипсовой коркой, привносятся при поливе соленой водой и при подъеме уровня грунтовых вод (Boulbaba et al., 2012). В почвах Австралии наличие гипса может снижать рН примерно до 8 на любых глубинах, как было показано, например, в исследовании V.N.L. Wong с соавторами (2009), а также может увеличивать электропроводность (Bouksila et al., 2013). Наши данные по электропроводности согласуются с данными, полученными Z. Haj-Amor с соавторами (2017) и Z. Омар с коллегами (2017). Высокая электропроводность также может быть

результатом использования соленой воды для орошения (от 2.5 до 4 г/л) и испарения почвенной влаги, что приводит к накоплению солей и, соответственно, последующему увеличению электропроводности. Более того, по данным Н.Т. Fourati с соавторами (2015), самая высокая степень засоления была обнаружена в прибрежной зоне Габеса в связи с ее затоплением морской водой.

**Таблица 3.** Органический почвенный углерод, твердые частицы углерода и неразлагаемый углерод в двух слоях для разных типов почв.

Площадки отбора проб	Органический почвенный углерод, г/кг	Твердые частицы углерода, г/кг	Неразлагаемый углерод, г/кг	Органический почвенный углерод, г/кг	Твердые частицы углерода, г/кг	Неразлагаемый углерод, г/кг
<b>Цементированные карбонатные почвы (Petric calcisols)</b>						
	<b>0-5 см</b>			<b>0-30 см</b>		
S1	19.4	5.97	13.42	14.70	5.62	9.08
S2	11.2	2.57	8.62	10.30	3.33	6.97
S3	14.6	4.01	10.58	11.00	3.48	7.52
S4	11.8	3.53	8.27	12.40	4.47	7.93
S5	8.1	0.79	7.31	4.80	0.92	3.88
Среднее значение	13.02	3.38	9.64	10.64	3.56	7.08
Стандартное отклонение	4.25	1.91	2.43	3.67	1.74	1.95
Коэффициент вариации	32.63	56.41	25.16	34.51	48.85	27.50
<b>Цементированные гипсовые почвы (Petric Gypsisols)</b>						
	<b>0-5 см</b>			<b>0-30 см</b>		
S1	13.40	4.18	9.22	8.40	2.65	5.75
S2	14.60	2.25	12.35	7.20	2.26	4.94
S3	13.70	3.40	10.30	11.90	2.36	9.54
S4	11.30	1.65	9.65	9.90	1.15	8.75
Среднее значение	13.25	2.87	10.38	9.35	2.10	7.25
Стандартное отклонение	1.40	1.14	1.39	2.03	0.66	2.24
Коэффициент вариации	10.54	39.53	13.36	21.68	31.15	30.92
<b>Гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks)</b>						
	<b>0-5 см</b>			<b>0-30 см</b>		
S1	15.00	3.62	11.38	9.40	1.38	8.02
S2	7.40	3.48	3.92	3.80	1.79	2.01
S3	6.50	1.00	5.50	14.40	3.18	11.22
S4	6.90	1.66	5.24	13.70	3.10	10.60
S5	6.90	2.50	4.40	14.00	4.13	9.87
Среднее значение	8.54	2.45	6.09	11.06	2.72	8.34
Стандартное отклонение	3.63	1.13	3.03	4.53	1.12	3.74
Коэффициент вариации	42.45	46.21	49.74	41.00	41.10	44.83
<b>Насыщенные слаборазвитые почвы (Eutric Regosols)</b>						
	<b>0-5 см</b>			<b>0-30 см</b>		
S1	13.10	3.14	9.96	11.30	3.12	8.18
S2	8.50	2.31	6.19	9.40	2.91	6.49
S3	3.80	1.18	2.62	7.10	0.86	6.24
Среднее значение	8.47	2.21	6.25	9.27	2.30	6.97
Стандартное отклонение	4.65	0.99	3.67	2.10	1.25	1.05
Коэффициент вариации	54.92	44.56	58.66	22.70	54.51	15.12

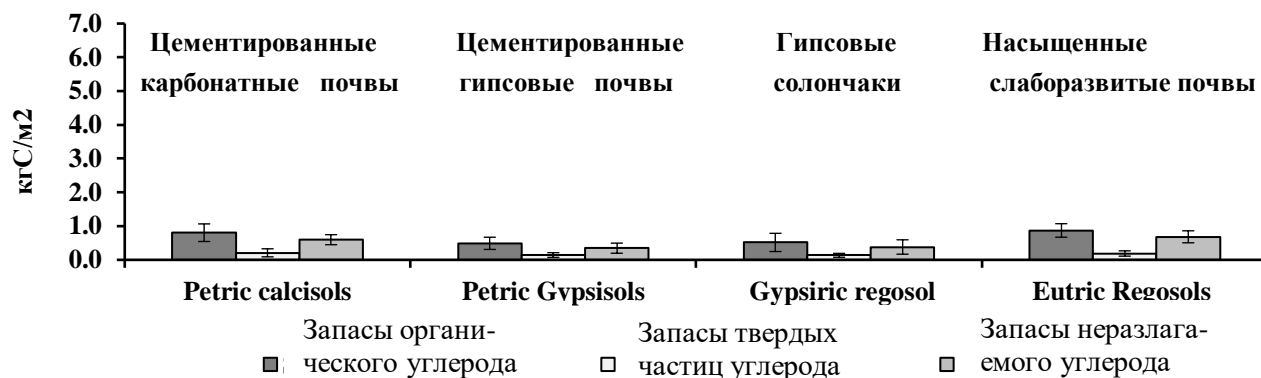


Рис. 2. Запасы органического углерода (в кгС/м<sup>2</sup>) в слое 0-5 см в разных типах почв.

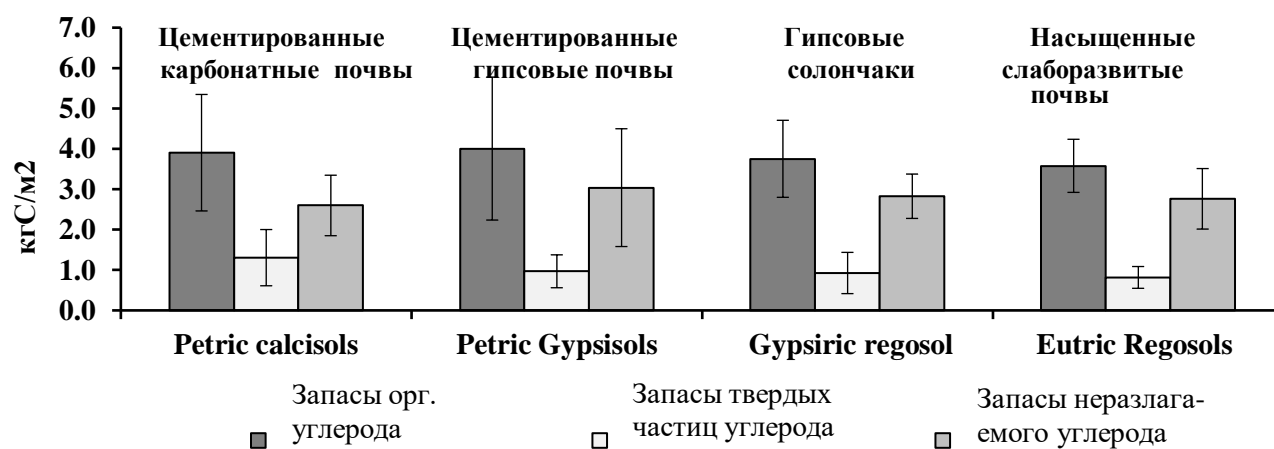


Рис. 3. Запасы органического углерода (в кгС/м<sup>2</sup>) в слое 0-30 см в разных типах почв.

Наши исследования показали низкие значения объемной плотности, аналогичные значениям, которые были получены для почв южной Испании в работе J.D.R. Sinoga с соавторами (2012) и для гипсоносной почвы оазиса аридного Туниса (Haj-Amor et al., 2017; Mlih, 2015). Однако наши результаты расходятся с данными нескольких работ по аридным почвам Австралии (Setia et al., 2011; Wong et al., 2009). Такие относительно низкие значения объемной плотности объясняются, в частности, наличием свежих органических остатков и корней. Кроме того, R. Mlih (2015) зафиксировал более высокие значения объемной плотности (1.7 г/см<sup>3</sup>) в прилегающей гипсоносной почве и значения, похожие на наши, в почвах оазиса Шенини. По мнению M. Amin с соавторами (2014), объемная плотность зависит от типа землепользования и почвенных свойств.

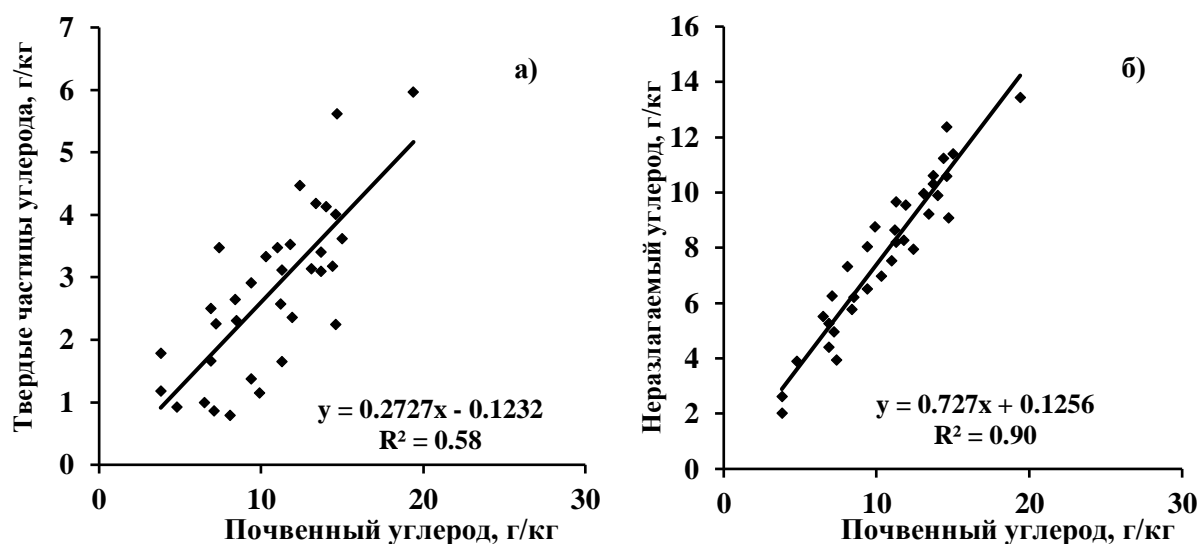
*Концентрации запасов органического углерода в почве.* По данным M. Munoz-Rojas с соавторами (2012), большая концентрация запасов органического углерода была обнаружена в слое 0-40 см аридного региона Испании. А значит, методы связывания почвенного углерода должны сфокусироваться на углероде, расположенном глубоко в почвенных недрах, особенно если речь идет об аридных регионах. В целом, наши результаты согласуются с результатами R. Mlih (2015) для того же региона. Наши значения запасов углерода в солончаках и слаборазвитых почвах (Regosols) оказались аналогичны значениям, полученным J. Albaladejo с соавторами (2013) для полуаридной Испании и N. Brahim с соавторами (2014) для Туниса, однако оказались ниже, чем значения S. Siebert (2005) для оазиса Оман – 30.7 г/кг. Стоит отметить, что в исследовании M. Munoz-Rojas с соавторами (2012), проведенном в Южной Испании, значения оказались выше для слаборазвитых почв (Regosols), но аналогичны для солончаков. Более того, концентрация твердых частиц углерода на глубине 0-5 см в цементированных карбонатных почвах (Petric calcisols) оказалась сопоставима (13.02 г/кг) с концентрацией в камбисолях (Cambisols; 14.3 г/кг), зафиксированной I. Dridi и M. Gueddari (2019) в Северном Тунисе. На глубине 0-30 см концентрации твердых частиц оказалась



в пределах, сравнимых с результатами A. Znaidi с соавторами (2019), полученными для слабозрелых почв (Regosols) центрального Туниса (8-14 г/кг), и С. Göll с соавторами (2017) – для полуаридных районов Турции. Однако в нашем исследовании эти концентрации значительно выше, чем в солончаках оазиса Кебили (Omar et al., 2017) и в некультуренных почвах Габеса (Mlih, 2015).

Такие данные означают, что даже в аридных условиях, для которых характерна высокая минерализация (Matzener, Borken, 2008), гипсоносные почвы сохраняют относительно высокие концентрации органического углерода на сельскохозяйственных землях оазиса. Содержание углерода в них оказалось ниже, чем в почвах субгумидной территории Туниса (до 80%) из исследования A. Bouajila с соавторами (2016) и в аридных почвах Австралии из исследования K.Y. Chan (2001). Тем не менее, наши концентрации были выше, чем у Z. Omar с соавторами (2017) в солончаках и литосолах (Lithosols) пустынного оазиса Кебили. Концентрации неразлагаемого углерода находились в том же диапазоне, что и некоторые почвы на севере (Bouajila et al., 2016) и юге Туниса (Omar et al., 2017, 2020). Иных исследований на содержание твердых частиц или неразлагаемого углерода в южном регионе не проводилось. Вышеупомянутые данные означают, что соотношение твердых частиц органического углерода/запасов углерода в почве несколько различается в верхнем слое в зависимости от типа почвы и глубины. В среднем, содержание твердых частиц углерода составило 21-29% от общего запаса углерода на глубине 0-5 см и 24-33% на глубине 0-30 см.

Запасы почвенного углерода являются основным источником таких частиц и неразлагаемых пулов в почвах исследованной территории (рис. 4). Наши данные об их содержании оказались в пределах того же диапазона, что и у K.Y. Chan (2001) в аналогичных условиях (климат, почвенные свойства, отбор проб с глубины 0-10 см) Южного Уэльса в Австралии. Широко известно, что аридные почвы стран Ближнего Востока и Северной Африки зачастую бедны органическим углеродом, содержание которого составляет в них < 0.5% (Mlih et al., 2016). Однако в нашем исследовании содержание углерода в слоях 0-5 и 0-30 см оказалось в полтора и более чем в два раза больше. Этот феномен можно объяснить постоянным обеспечением окультуренных оазисных почв органическими веществами.



**Рис. 4.** Отношение органического углерода в почве с твердыми частицами (а) и неразлагаемым углеродом (б).

*Запасы пулов органического углерода в почвах.* Самая низкая плотность почвенного углерода была обнаружена в Южном Тунисе, поскольку там расположена большая часть пустыни. В слое 0-30 см оазисной почвы запасы оказались больше, чем в исследовании N. Brahim с соавторами (2014), которые установили, что на юго-востоке Туниса запасы в слое 0-30 см составляют в среднем 1.87 кгС/м<sup>2</sup>. Кроме того, запасы в насыщенных слабозрелых почвах (Eutric Regosols) оазиса оказались аналогичны таковым в слабозрелых почвах Бразилии (Batjes, 2005) и Туниса – 3.1 кгС/м<sup>2</sup>

(Brahim et al., 2014; Znaidi et al., 2019). Гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks) оазиса содержали более высокие запасы углерода, чем другие солончаки Туниса –  $2.8 \text{ кгС/м}^2$  (Brahim et al., 2014), однако такие же значения были зарегистрированы для солончаков и литосолей (Lithosols) оазиса Кебили. Запасы органического углерода в цементированных карбонатных почвах (Petric Calcisols) в нашем исследовании оказались в том же диапазоне значений, что и в некоторых других работах (Batjes, 2005; Munoz-Rojas et al., 2012). Можно утверждать, что высокие запасы органического углерода в почвах оазиса, вероятно, связаны с попаданием в них перерабатываемых органических остатков, в т.ч. от финиковых пальм. Также мы полностью согласны с мнением R. Lal с соавторами (1999) о том, что аридные почвы могут выступать в качестве поглотителя запасов органического углерода. Во время формирования данного оазиса С. Li с соавторами (2019) доказали высокий потенциал связывания углерода по всему почвенному профилю, а также положительную связь между макроагрегатами и накоплением углеродных запасов. Запасы твердых частиц углерода здесь были несколько выше, чем в оазисе Кебили из исследования Z. Omar с соавторами (2017). Других исследований по запасам твердых частиц в аридных почвах Туниса, к сожалению, не проводилось. В целом, низкие запасы частиц углерода по сравнению с запасами почвенного углерода могут быть результатом высокой минерализации органических веществ в данном регионе.

Минерализацию почвы оазиса повышает вода, используемая при поливе, и высокая температура. О.О. Akinremi с соавторами (1999) подтвердили, что влажность и температура выступали основными факторами, влияющими на почвенное дыхание. Однако значения неразлагаемого органического углерода были значительно выше, чем значения, зарегистрированные Z. Omar с соавторами (2017) в оазисе Кебили. Такие данные согласуются с данными S. Tripathi с коллегами (2006). Запасы твердых частиц углерода/запасы углерода варьировали от 22 до 33% (табл. 4). В разных типах почв и в разных слоях неразлагаемый углерод выступал в качестве самого большого углеродного пула. Самая высокая концентрация неразлагаемого углерода была выявлена в гипсовых солончаках (Gypsic Solonchaks) –  $3.04 \text{ кг/м}^2$ . Можно предположить, что наличие высокого содержания карбоната кальция и гипса защищает неразлагаемый углерод от минерализации. Наше исследование подтверждает, что в этой почве основную часть занимал рекальцитрантный пул органических веществ. А значит, крайне важно сохранить сельскохозяйственную экосистему аридных оазисов для более эффективного депонирования углерода.

**Таблица 4.** Доля нерекальцитрантного органического углерода в исследованных почвах.

Глубина	Цементированные карбонатные почвы (Petric calcisols)	Гипсовые солончаки (Gypsic Solonchaks)	Насыщенные слаборазвитые почвы (Eutric Regosols)	Цементированные карбонатно-гипсовые почвы (Petrocalcic Gypsisols)
<b>Запасы твердых частиц/запасы углерода, %</b>				
0-5 см	25.8	29.3	26.2	21.6
0-30 см	33.4	24.2	24.7	22.8

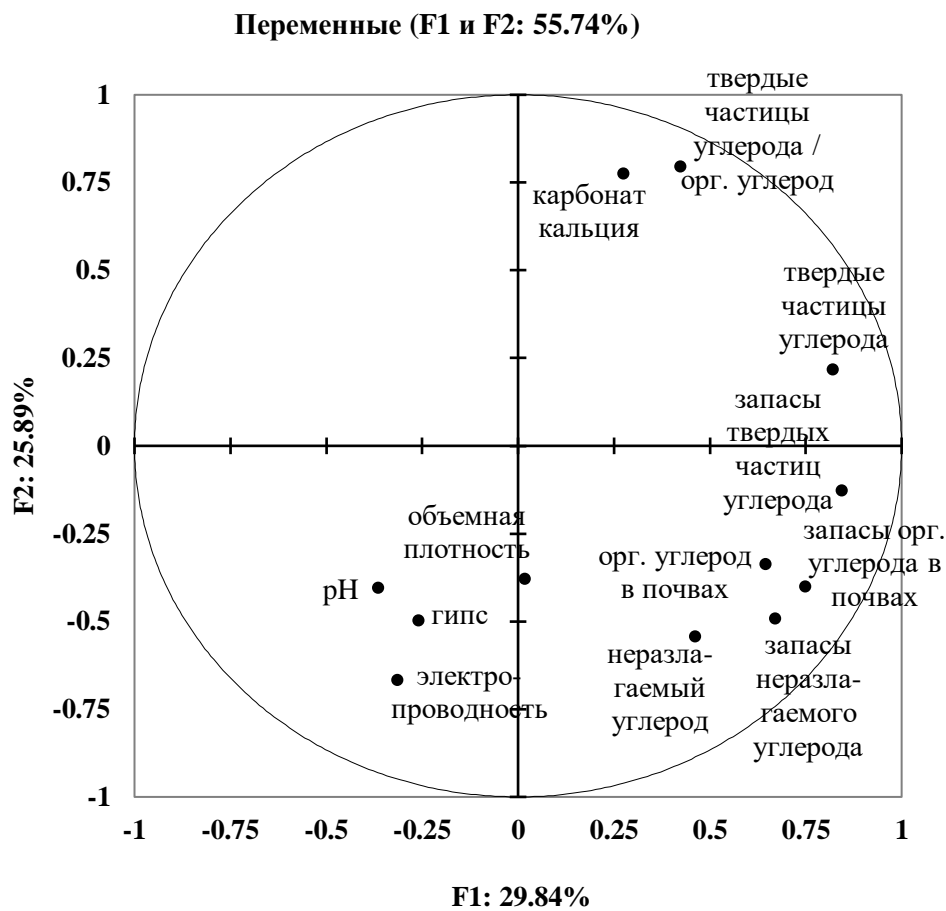
*Влияние свойств почвы на пулы и запасы органического углерода в почвах.* На основе результатов анализа почвенных образцов мы составили матрицу со значимыми корреляциями Пирсона  $p < 0.01$  (\*\*) и  $p < 0.05$  (\*; табл. 5). Значимые и положительные корреляции (табл. 5) наблюдались между почвенными свойствами гипсоносной почвы: например,  $p < 0.05$  у pH и электропроводности с объемной плотностью с коэффициентами корреляции равными 0.404 и 0.430 соответственно; или у электропроводности и содержании гипса ( $r = 0.308$ ). Гипс был определен нами как фактор, повышающий засоление почвы после растворения в воде. Однако между карбонатом кальция и электропроводностью ( $r = -0.393$ ,  $p < 0.05$ ) с гипсом ( $r = -0.532$ ,  $p < 0.01$ ) корреляция оказалась отрицательной. В отличие от многих других авторов, мы не обнаружили корреляций между запасами органического углерода и объемной плотностью, поскольку значения второй были относительно низкими и сходными для разных почв и разной глубины. Тем не менее, в таблице 5 показано, что для пулов органического углерода только твердые частицы отрицательно коррелировали как с pH ( $r = -0.393$ ,  $p < 0.05$ ), так и с электропроводностью ( $r = -0.353$ ,  $p < 0.05$ ). Можно предположить, что высокая

засоленность гипсоносных почв является препятствием для процесса разложения взвешенного органического вещества. По данным R. Setia с соавторами (2011), засоление оказало выраженный негативный эффект на разложение органических веществ.

**Таблица 5.** Корреляция Пирсона между свойствами почв, пулами и запасами органического углерода.

Переменные	pH	Электро-проводность	Объемная плотность	Гипс	Карбонат кальция	Почвенный углерод	Твердые частицы	Неразлагаемый углерод	Запасы почвенного углерода	Запасы Твердых частиц	Запасы неразлагаемого углерода
pH	1.000										
Электро-проводность	0.404*	1.000									
Объемная плотность	0.430*	0.195	1.000								
Гипс	-0.069	0.380*	-0.136	1.000							
Карбонат кальция	-0.293	-0.393*	-0.183	-0.532**	1.000						
Почвенный углерод	-0.203	0.068	0.040	0.002	-0.078	1.000					
Твердые частицы	-0.393*	-0.353*	-0.058	-0.278	0.335	0.762**	1.000				
Неразлагаемый углерод	-0.082	0.255	0.079	0.132	-0.259	0.953**	0.529**	1.000			
Запасы углерода	-0.030	-0.001	0.177	-0.006	-0.079	0.268	0.273	0.223	1.000		
Запасы твердых частиц	-0.121	-0.191	0.099	-0.133	0.102	0.271	0.488**	0.126	0.910**	1.000	
Запасы неразлагаемого углерода	0.010	0.079	0.201	0.047	-0.150	0.252	0.169	0.251	0.985**	0.824**	1.000

Более высокие корреляции ( $p < 0.01$ ) были обнаружены между углеродными пулами и самими запасами. Можно утверждать, что в данном исследовании единственный фактор, контролирующий содержание органического углерода в почвах, – это рециркуляция остатков свежего органического вещества на гипсоносной поверхности в оазисных условиях. С помощью анализа основных компонентов мы обобщили влияние почвенных свойств на пулы и запасы (рис. 5). Первые два компонента объяснили по крайней мере 55.7% общей дисперсии. Все переменные углеродных пулов и запасов (т.е. органический почвенный углерод, твердые частицы углерода, неразлагаемый углерод и запасы каждого из трех) имели положительные координаты по первому фактору (F1) – 29.8% дисперсии. Однако по второму фактору (F2 – 25.8%) карбонат кальция и доли твердых частиц углерода/почвенного углерода имели высокие положительные координаты, в отличие от таких переменных, как электропроводность, содержание гипса, pH и объемная плотность. Анализ основных компонентов ясно показывает, что поступление углерода в почвы является наиболее важным фактором, контролирующим его запасы в исследованных почвах. Тем не менее, карбонат кальция и электропроводность – это основные факторы, влияющие на разложение неразлагаемого углерода. По-видимому, накопление углерода и твердых частиц – это часть баланса между карбонатом кальция, электропроводностью (фактором, ограничивающим деградацию органических остатков) и степенью минерализации (которая усиливается из-за микроклиматических условий). Следовательно, гипсоносные аридные почвы способны накапливать органический углерод, если они постоянно пополняются органическими останками в условиях сельскохозяйственных земель оазиса.



**Рис. 5.** Анализ основных аналитических свойств почвы и пулов и запасов органического углерода в ней.

### Выводы

Таким образом, мы делаем вывод о том, что аридные почвы могут хранить более 1% органического углерода в оазисах (глобально аридные – не более 0.5%). Не разлагаемый углерод оказался основным пулом, который нам удалось обнаружить, потому что, вероятно, от разложения его защищает засоление почвы. Также данное исследование показывает, что сельскохозяйственные экосистемы оазиса положительно влияют на запасы органического углерода в гипсоносных почвах: в слое 0-5 см запасы колебались в среднем от 0.4 до 0.8 кгС/м<sup>2</sup>, а в слое 0-30 см достигали в среднем 4 кгС/м<sup>2</sup> как в цементированных карбонатных почвах (Petric Calcisols), так и в гипсовых солончаках (Gypsic Solonchaks), и 3.5 кгС/м<sup>2</sup> – в насыщенных слабозрелых (Eutric Regosols) и цементированных гипсовых (Petric Gypsisols) почвах. Данные показатели близки к значениям, которые были рассчитаны для других систем землепользования в более влажных регионах. Основная часть углеродных запасов существует благодаря мелкодисперсным минеральным, относительно стабильным включениям. Главный фактор, который контролирует запасы углерода в перечисленных почвах, это их постоянное пополнение свежими органическими останками, в частности, от финиковых пальм. Поэтому в аридных регионах адаптированные сельскохозяйственные системы, особенно оазисы, улучшают связывание органического углерода в аридных условиях.

*Финансирование.* Данное исследование осуществлялось в рамках Исследовательского гранта (STC\_TUNGER-006/INTOASES) в рамках двустороннего научно-технического сотрудничества Тунисской Республики и Федеративной Республикой Германия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Akinremi O.O., McGinn S.M., McLean H.D.J. 1999. Effects of Soil Temperature and Moisture on Soil Respiration in Barley and Fallow Plots // Canadian Journal of Soil Science. Vol. 79. P. 5-13.
- Amin M., Khan M.J., Jan M.T., ur Rehman M., Tariq J.A., Hanif M., Shah Z. 2014. Effect of Different Tillage Practices on Soil Physical Properties under Wheat in Semi-arid Environment // Soil Environment. Vol. 33. P. 33-37.
- Albaladejo J., Ortiz R., Garcia-Franco N., Ruiz N.A., Almagro M., Pintado J.G., Martínez-Mena M. 2013. Land Use and Climate Change Impacts on Soil Organic Carbon Stocks in Semi-arid Spain // Journal of Soils Sediments. Vol. 13. P. 265-277.
- Batjes N.H. 2002. Carbon and Nitrogen Stocks in the Soils of Central and Eastern Europe // Soil Use Management. Vol. 18. P. 324-329.
- Batjes N.H. 2005. Organic Carbon Stocks in Soils of Brazil // Soil Use Management. Vol. 21. P. 22-24.
- Bouajila A., Gallali T. 2010. Land Use Effect on Soil and Particulate Organic Carbon, and Aggregate Stability in Some Soils in Tunisia // African Journal of Agricultural Research. Vol. 5. P. 764-774.
- Bouajila A., Brahim N., Gallali T. 2016. Rôle des différentes fractions organiques dans la stabilité structurale des sols à textures riches en sables du Nord et du Centre de la Tunisie // Etude et Gestion des Sols. Vol. 23. P. 79-92 (in French).
- Bouksila F., Bahri A., Berndtsson R., Persson M., Rozema J., Zee V. 2013. Assessment of Soil Salinization Risks under Irrigation with Brackish Water in Semiarid Tunisia // Environmental and Experimental Botany. Vol. 92. P. 176-185.
- Boulbaba A., Marzouk L., Rabah B.R., Najet S. 2012. Variations of Natural Soil Salinity in an Arid Environment Using Underground Watertable Effects on Salinization of Soils in Irrigated Perimeters in South Tunisia // International Journal of Geoscience. Vol. 3. P. 1040-1047.
- Brahim N., Ibrahim H., Hatira A. 2014. Tunisian Soil Organic Carbon Stock: Spatial and Vertical Variation // Procedia Engineering. Vol. 69. P. 1549-1555.
- Brahim N., Karbout N., Dhaouadi L., Bouajila A. 2021. Global Landscape of Organic Carbon and Total Nitrogen in the Soils of Oasis Ecosystems in Southern Tunisia // Agronomy. Vol. 11. P. 1903.
- Cambardella C.A., Elliot E.T. 1992. Particulate Soil Organic Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence // Soil Science Society of America Journal. Vol. 56. P. 777-783.
- Chan K.Y. 2001. Soil Particulate Organic Carbon under Different Land Use and Management // Soil Use and Management. Vol. 17. P. 217-221.
- Dridi I., Gueddari M. 2019. Field and Laboratory Study of Nitrogen Mineralization Dynamics in Four Tunisian Soils // Journal of African Earth Sciences. Vol. 154. P. 101-110.
- Elbasiouny H., Bowaly A., Gad A., Alkheir A.A., Elbehiry F. 2017. Restoration and Sequestration of Carbon and Nitrogen in the Degraded Northern Coastal Area in Nile Delta, Egypt for Climate Change Mitigation // Journal of Coastal Conservation. Vol. 21. P. 105-114.
- Göl C., Bulut S., Bolat F. 2017. Comparison of Different Interpolation Methods for Spatial Distribution of Soil Organic Carbon and Some Soil Properties in Black Sea Backward Region of Turkey // Journal of African Earth Sciences. Vol. 06.014. P. 85-91.
- Haj-Amor Z., Hashemi H., Bouri S. 2017. Soil Salinization and Critical Shallow Groundwater Depth under Saline Irrigation Condition in a Saharan Irrigated Land // Arabian Journal of Geosciences. Vol. 10. P. 301-312.
- Hassink J., Whitmore A.P., Kubat J. 1997. Size and Density Fractionation of Soil Organic Matter and the Physical Capacity of Soils to Protect Organic Matter // European Journal of Agronomy. Vol. 7. P. 189-199.
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps // World Soil Resources Reports. Rome: FAO. No. 106. 192 p.
- Lal R. 2002. Carbon Sequestration in Dryland Ecosystems of West Asia and North Africa // Land Degradation and Development. Vol. 13. P. 45-59.
- Lal R., Hassan H.M., Dumanski J. 1999. Desertification Control to Sequester C and Mitigate the Greenhouse Effect // Carbon Sequestration in Soils: Science, Monitoring and Beyond / Eds. N. Rosenberg, R.C. Izaurralde, E.L. Malone. Columbus, OH: Battelle Press. P. 83-149.
- Li C., Li Y., Xie J., Liu Y., Wang Y., Liu X. 2019. Accumulation of Organic Carbon and Its Association with Macro-aggregates During 100 Years of Oasis Formation // Catena. Vol. 172. P. 770-780.
- Liebens J., van Molle M. 2003. Influence of Estimation Procedure on Soil Organic Carbon Stock Assessment in Flanders, Belgium // Soil Use Manage. Vol. 19. P. 364-371.
- McLean E.O. 1982. Soil pH and Lime Requirement // Methods of Soil Analysis. Pt. 2, 2<sup>nd</sup> ed. / ed. A.L. Page. Vol. 9. Maddison, WI: ASA and SSSA. P. 199-224.
- Matzener E., Borken W. 2008. Do Freeze/Thaw Events Enhance C and N Losses from Soil of Different Ecosystems? A Review // European Journal of Soil Science. Vol. 5. P. 274-284.
- Mlih R. 2015. Soil Organic Matter Management in Coastal and Desert Oasis – A Case Study for the Gabès and Kebili Oasis in Tunisia. Master Thesis. Germany: Yulich University. 94 p.

- Mlih R., Bol R., Amelung W., Brahim N.* 2016. Soil Organic Matter Amendments Indate Palm Groves of the Middle Eastern and North African Region: A Mini-review // *Journal of Arid Land*. Vol. 8. P. 77-92.
- Mlih R., Gocke M.I., Bol R., Berns A.E., Fuhrmann I., Brahim N.* 2019. Soil Organic Matter Composition in Coastal and Continental Date Palm Systems – Insights from Tunisian Oases // *Pedosphere*. Vol. 29. P. 444-456.
- Munoz-Rojas M., Jordan A., Zavala L., de la Rosa D., Abd-Elmabod S., Anaya-Romero M.* 2012. Organic carbon stocks in Mediterranean soil types under different land uses (Southern Spain) // *Solid Earth*. Vol. 3. P. 375-386.
- Nelson R.E.* 1982. Carbonate and Gypsum // *Methods of Soil Analysis*. Pt. 2, 2<sup>nd</sup> ed. / ed. A.L. Page. Maddison, WI: ASA and SSSA. Vol. 9. P. 181-197.
- Nelson D.W., Sommers L.E.* 1982. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter // *Methods of Soil Analysis*. Pt. 2, 2<sup>nd</sup> ed. / eds. A.L. Page, R.H. Miller. Maddison, WI: ASA and SSSA. P. 539-577.
- Omar Z., Bouajila A., Brahim N., Grira M.* 2017. Soil Property and Soil Organic Carbon Pools and Stocks of Soils Under Oasis in Arid Regions of Tunisia // *Environmental Earth Sciences*. Vol. 76. P. 415-425.
- Omar Z., Bouajila A., Bouajila J., Rahman R., Besser H., Hamed Y.* 2020. Spectroscopic and Chromatographic Investigation of Soil Organicmatter Composition for Different Agrosystems from Arid Saline Soils from Southeastern Tunisia // *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 13. 524 p.
- Pandey C.B., Singh G.B., Singh S.K., Singh R.K.* 2010. Soil Nitrogen and Microbial Biomass Carbon Dynamics in Native Forests and Derived Agricultural Land Uses in a Humid Tropical Climate of India // *Plant and Soil*. Vol. 33. P. 453-467.
- Pouget M.* 1965. Etude pédologique de la zone Gabès-Nord // *Sect. Et. Pehl*. Vol. 246. 76 p.
- Setia R., Marschner P., Baldock J., Chittleborough D., Smith P., Smith J.* 2011. Salinity Effects on Carbon Mineralization in Soils of Varying Texture // *Soil Biology & Biochemistry*. Vol. 43. P. 1908-1916.
- Siebert S.* 2005. Analysis of Arid Agricultural Systems Using Quantitative Image Analysis, Modeling and Geographical Information Systems. Kassel University press GmbH. 180 p.
- Sinoga J.D.R., Pariente S., Diaz A.R., Francisco J., Murillo M.* 2012. Variability of Relationships Between Soil Organic Carbon and Some Soil Properties in Mediterranean Rangelands under Different Climatic Conditions (South of Spain) // *Catena*. Vol. 94. P. 17-25.
- Smith J.L., Doran J.W.* 1996. Measurement and Use of pH and Electrical Conductivity for Soil Quality Analysis // *Methods for Assessing Soil Quality*. Madison, WI: Soil Science Society of America, Special Publication. Vol. 49. P. 169- 185.
- Suliman M., Sallam A.A.* 2016. Improved Method to Determine Particle Size Distribution for Some Gypsiferous Soils. A Case Study from Al-Ahsa Governorate, Saudi Arabia // *Eurasian Soil Science*. Vol. 5. P. 322-331.
- Fourati T.H., Bouaziz M., Benzina M., Bouaziz S.* 2015. Modeling of Soil Salinity within a Semi-arid Region Using Spectral Analysis // *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 8. P. 11175- 11182.
- Tripathi S., Kumari A., Chakraborty A., Gupta A., Chakrabarti K., Bandyapadhyay B.K.* 2006. Microbial Biomass and Its Activities in Salt-affected Coastal Soils // *Biology and Fertility of Soils*. 42. P. 273-277.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 1997. World Atlas of Desertification. 2<sup>nd</sup> ed. 182 p.
- Vieillefont J.* 1979. Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux // *Cahiers ORSTOM. Série Pédol.* Vol. 17. P. 195-223. (in Frensh)
- Wang S., Wilkes A., Zhang Z., Chang X., Lang R., Wang Y., Niu H.* 2011. Management and Land Use Change Effects on Soil Carbon in Northern China's Grasslands: A Synthesis // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 142. P. 329-340.
- Wiesmeier M., Schad P., Poeplau C., Spörlein P., Geuß U., Hangen E., Reischl A., Schilling B., Kögel-Knabner I.* 2014. Quantification of Functional Soil Organic Carbon Pools for Major Soil Units and Land Uses in Southeast Germany (Bavaria) // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 185. P. 208-220.
- Wong V.N.L., Dalal R.C., Greene R.S.B.* 2009. Carbon Dynamics of Sodic and Salin Soils Following Gypsum and Organic Material Additions: A Laboratory Incubation // *Applied Soil Ecology*. Vol. 41. P. 29-40.
- Xu E., Zhang H., Xu Y.* 2020. Exploring Land Reclamation History: Soil Organic Carbon Sequestration due to Dramatic Oasis Agriculture Expansion in Arid Region of Northwest China // *Ecological Indicators*. Vol. 108. P. 105746.
- Yigini Y., Panagos P.* 2016. Assessment of Soil Organic Carbon Stocks under Future Climate and Land Cover Changes in Europe // *Science of the Total Environment*. Vol. 557. P. 838-850.
- Zhang K.C., An Z.S., Cai D.W., Guo Z.C., Xiao J.H.* 2017. Key Role of Desert-Oasis, Transitional Area in Avoiding Oasis Land Degradation from Aeolian Desertification in Dunhuang, Northwest China // *Land Degradation & Development*. Vol. 28. P. 142-150.
- Znaidi A., Brahim N., Ibrahim H., Bol R., Chaouachi M.* 2020. Comparison of Organic Carbon Stock of Regosols under Two Different Climates and Land Use in Tunisia // *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 13. P. 1011.