

**ИЗУЧЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА НАКОПЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В  
ПОСТАГРОГЕННЫХ ПОЧВАХ ДРЕВНЕЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ РАЙОНОВ  
СТЕПНОЙ ЗОНЫ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

**STUDY OF THE POTENTIAL FOR ACCUMULATION OF ORGANIC CARBON IN  
POSTAGROGENIC SOILS OF ANCIENT AGRICULTURAL REGIONS OF THE STEPPE  
ZONE FOR THE PURPOSES OF REGENERATIVE AGRICULTURE**

Лисецкий Ф.Н.  
Lisetskii F.N.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия  
Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

E-mail: fnliset@mail.ru

**Аннотация.** Обобщенная выборка авторских данных по содержанию и качественным характеристикам органического вещества и гранулометрическому составу почв разновременных залежей и их целинных аналогов в степной зоне Нижнего Побужья и Северо-Западного Крыма включала более 150 определений. Установлено, что углеродпротекторная емкость почвы, которая учитывает долю частиц размером <0,02 мм, закономерно увеличивается от целинных почв к старозалежным почвам и молодым залежам в обоих регионах, но эта емкость во всех вариантах почв выше у крымских почв. Влияние длительного агропедогенеза отражается в том, что агропочвы длительного земледельческого использования характеризуются увеличением доли частиц от фракции крупной пыли и мельче, что находит свое отражение в повышенной углеродпротекторной емкости у постантичных залежей. Определено совместное влияние различий биоклиматических условий, гранулометрического состава почв и длительности земледелия на содержание и качественные характеристики органического вещества постагrogenных степных почв на территории двух древнегреческих аграрных зон Северного Причерноморья. Показано, что углерододепонирующий потенциал степных почв в наиболее значительной степени определяется долей частиц размером 0,05-0,01 мм.

**Ключевые слова:** почвы степной зоны, разновременные залежи, органический углерод почвы, углеродпротекторная емкость почвы

**Abstract.** A generalized selection of the author's data on the content and qualitative characteristics of organic matter and the granulometric composition of soils of deposits of different periods and their virgin analogues in the steppe zone of the Lower Bug region and North-Western Crimea included more than 150 determinations. It has been established that the carbon protective capacity of the soil, which takes into account the proportion of particles < 0.02 mm in size, naturally increases from virgin soils to old fallow soils and young fallows in both regions, but this capacity in all soil variants is higher in Crimean soils. The influence of long-term agropedogenesis is reflected in the fact that agro-soils during long-term farming are characterized by an increase in the proportion of particles from the coarse and finer dust fraction, which is reflected in the increased carbon protective capacity of post-antique deposits. The joint influence of differences in bioclimatic conditions, soil granulometric composition and duration of farming on the content and qualitative characteristics of organic matter in postagrogenic steppe soils on the territory of two ancient Greek agricultural zones of the Northern Black Sea region was determined. It has been shown that the carbon sequestration potential of steppe soils is most significantly determined by the proportion of particles 0.05-0.01 mm in size.

**Key words:** steppe soils, fallow lands of different periods, soil organic carbon, soil carbon protective capacity

**Введение.** Разнообразие траекторий процесса ренатурации нарушенных земель первоначально определяется особенностями отдельных типов ренатурационных геосистем (постагrogenных [1], постселитебных [2], а также различных объектов историко-археологического наследия (курганы, фортификационные сооружения) [3, 4]). За XX век подавляющая часть оставленных сельскохозяйственных угодий претерпела трансформацию в залежные земли, ставшие ареной формирования постагrogenных экосистем под влиянием запуска механизма природных процессов в своеобразной климатической обстановке [5, 6, 7]. Масштабные процессы автогенных сукцессий на образовавшихся залежах в степной зоне правомерно оценивать, как уникальный эксперимент по самовосстановлению потенциала степных экосистем [5]. Основными компонентами постагrogenных экосистем, быстро

реагирующими на смену экологических условий, являются почвы и растительность, которые, хотя и воспроизводятся взаимосвязано, но проходят разные пути онтогенетического развития – по сущности процессов, длительности, стадильности, влияния на них прошлых и меняющихся условий среды [7]. В молодых экосистемах при разнообразии возможных траекторий рецентного почвообразовательного процесса их оптимальные варианты во многом детерминированы субстратно-фитоценотическими условиями и, в особенности, такими предпосылками развития автогенных сукцессий, как стартовые условия, внешнее окружение и климатические пульсации [8].

Как показали результаты многолетних исследований степей Северного Причерноморья [9, 10], типчаково-ковыльные ассоциации коренного облика воспроизводят в надземном и подземном (0-20 см) ярусах в среднем за год 12 т/га растительного вещества, которое обеспечивает приход гумуса 2,4-2,5 т/га в год. В условиях целины в 2,5 раза больше растительного вещества поступает за счет корневого отпада, чем в результате поверхностного опада [11]. Скорость разложения надземной фитомассы трех основных агроботанических групп (разнотравье, бобовые, злаки) выше, чем подземной фитомассы в 1,2-4,3 раза [12]. Ежегодно в гумусово-аккумулятивном горизонте почв степной зоны полной трансформации подвержено 7 т/га корневой массы, что обеспечивает ежегодное поступление около 2 т/га гумуса. Примечательно, что в ходе залежной сукцессии в первую очередь восстанавливаются видовой состав фитоценоза и запасы почвенного органического вещества, свойственные зональным целинным почвам, а наиболее медленно формируется структура фитомассы подземного яруса [13]. Однако, как показано ранее [14], длительностью сукцессии не снимаются сохраняющиеся и через несколько тысячелетий различия в продуктивности, обусловленные онтогенетической зрелостью почв или их агрогенной преобразованностью. К настоящему времени накоплено большое количество данных о стадиях автогенных сукцессий у постагрогенных экосистем по длительности ренатурационных процессов, приближающихся к квазиклиматическому. Тем не менее, остается мало изученным феномен формирования залежей с многовековым режимом зацелинения в степной зоне для понимания закономерностей достижения равновесного состояния экосистем этого типа, прежде всего, их почвенной подсистемы, в конкретных биоклиматических условиях.

Цель исследования состояла в изучении особенностей формирования содержания и качественных характеристик органического вещества в различных по гранулометрическому составу почвах, относящихся к разновременным залежам и их целинным аналогам, в двух древнеземледельческих районах степной зоны Северного Причерноморья.

**Методы.** Содержание органического вещества (ОВ) в почве определяли по методу Тюрина (ГОСТ 26213-2021), общего азота в почве по ГОСТ Р 58596-2019; групповой состав гумуса – по методике Пономаревой-Плотниковой в модификации 1968 года. Гранулометрический состав почвы определяли двумя методами: методом пипетки с обработкой пирофосфатом натрия и на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц *Analysette 22 MicroTec* (Германия, *Fritsch GmbH*). Углеродпротекторная емкость почвы (Carbon Protection Capacity, *CPC*, гСкг<sup>-1</sup>), которая была рассчитана по авторским данным с учетом доли гранулометрических фракциях пыли и глины с размером частиц <0,02 мм [15], обозначена как *CPC-1*, а по формуле, учитывающей минералогический состав и долю частиц <0,05 мм [16] как *CPC-4*.

При количественном обосновании биоэнергетической системы общностей (парагенетических семейств почв и растительности) в зональном распределении ландшафтов предложено [17] рассчитывать годовую величину климатических затрат энергии на почвообразование ( $Q$ , МДж/м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>) по формуле, авторская запись которой была нами приведена к единицам СИ:

$$Q = R \cdot \exp\left(-1,23 \cdot \frac{R^{0,73}}{P}\right),$$

где  $R$  – радиационный баланс, МДж/м<sup>2</sup>год<sup>-1</sup>;  $P$  – годовая сумма осадков, мм.

**Объекты исследования.** Нижнее Побужье это интересный исследовательский полигон для изучения сформировавшихся здесь долговременных залежей после окончания античного этапа землепользования на территории сельской округи Ольвии – античного полиса с тысячелетней историей (VI в. до н.э. – IV в.н.э.). Территория, занятая ольвиополитами под сельскохозяйственные угодья с ярко выраженной специализацией на производство зерна, могла достигать 70-78 тыс. га, а с V по III вв. до н.э. землепользование было территориально устойчивым, так как регламентировалось упорядоченной системой земельных наделов [18].

Исследования в Северо-Западном Крыму проводили на территории Евпаторийско-Сакского физико-географического района и на Тарханкутской возвышенной равнине, которые отличались по длительности истории земледелия в античную эпоху. Вблизи Евпатории функционировала с начала последней трети VI в. до н.э. и до II в. до н.э. сельскохозяйственная округа Керкинитиды. А на Тарханкуте в конце третьей четверти IV в. до н.э. стала формироваться дальняя хора Херсонеса Таврического, где длительность земледелия вблизи отдельных аграрных центров различалась, но была значительно меньше, чем у Керкинитиды. Линейное расстояние от Ольвии, расположенных к юго-востоку от нее крупных аграрных центров Северо-Западного Крыма, таких как Калос-Лимен и Керкинитиды, составляет 150 км и 200 км соответственно. Нижнее Побужье (правобережье Бугского лимана) это регион, где от широты города Николаева к югу на протяжении 40 км сменяют друг друга чернозёмы южные слабогумусово-аккумулятивные пылевато-тяжелосуглинистые на лессовых породах, чернозёмы южные солонцеватые того же гранулометрического состава, а в приморской зоне – темно-каштановые низкогумусово-аккумулятивные средне- и тяжелосуглинистые почвы. На территории Равнинного Крыма чернозёмы южные и темно-каштановые почвы представлены инверсионно: сухостепная подзона расположена к северу от южностепной подзоны. По массовым данным крупномасштабного картографирования почв Нижнего Побужья с выполнением агрохимических анализов в 1961-1963 гг. чернозёмы южные среднесуглинистые и легкоглинистые в слое 0-20 см содержали от 3,5% до 4,1% гумуса, темно-каштановые средне- и тяжелосуглинистые почвы в аналогичном слое содержали 2,8-2,9% гумуса. Эти различия гумусированности обусловлены, прежде всего, гидротермическими условиями двух почвенных подзон. В степной зоне Крымского полуострова чернозёмы южные на лессовых породах, преимущественно тяжелосуглинистые, содержат в верхнем горизонте не более 3% гумуса, а в аккумулятивном горизонте темно-каштановых почв содержание гумуса находится в диапазоне 2,0-2,9%.

Очевидно, что процессы ренатурации проходили в разновременных постагрогенных почвах в различных биоклиматических обстановках. Согласно почвенно-географическому районированию [19], оба региона относятся к южной степи, однако Нижнее Побужье – это часть умеренно-континентальной восточноевропейской почвенно-климатической фации, тогда как территория Северо-Западного Крыма входит в состав теплой понтической южноевропейской почвенно-климатической фации. Характерная особенность климата Нижнего Побужья – это значительные колебания атмосферных осадков в отдельные годы. Так, по данным наблюдений метеостанции Очаков (37 м над у.м.) с 1877 г. был зафиксирован минимум осадков – 218 мм (1911 г.) и максимум – 599 мм (1930 г.), тогда как обобщение по временному ряду за послевоенные годы (до 1959 г.) показало среднегодовую величину 327 мм [20]. Однако в более поздний климатический период при направленном увеличении теплообеспеченности отмечался общий рост увлажнения. Так, за период 1961-1990 гг. средняя годовая сумма осадков по мтс. Очаков составляла уже 491 мм, но за период 1991-2021 гг. (Climate-Data.org) она снизилась на 62 мм (до 429 мм) при средней годовой температуре воздуха 11,7°C (ранее за норму принималась величина 9,9°C). Анализ погодичного варьирования метеопараметров с помощью определения основной тенденции временного ряда ([meteoblue.com/ru/climate-change](http://meteoblue.com/ru/climate-change)) показал, что за последние 40 лет (1979-2023 гг.) средняя годовая температура увеличилась по тренду с 9,6 до 12,2°C, а среднее годовое количество осадков снизилось по тренду с 462 до 422,5 мм. Таким образом, величина Q в приморской зоне Нижнего Побужья не превышает 972 МДж/м<sup>2</sup>год<sup>-1</sup>, а к северу увеличивается до 1030 МДж/м<sup>2</sup>год<sup>-1</sup>.

По метеостанции Евпатория (11 м над у.м.) нормой годовой суммы осадков считалась величина 358 мм (с колебаниями сумм по экстремальным годам в 2,5 раза), при средней годовой температуре 10,6°C [21], что определяло величины климатических затрат энергии на почвообразование (Q) 1000-1100 МДж/м<sup>2</sup>год<sup>-1</sup>. Анализ погодичного варьирования метеопараметров с помощью определения основной тенденции временного ряда ([meteoblue.com/ru/climate-change](http://meteoblue.com/ru/climate-change)) показал, что за последние 40 лет (1979-2023 гг.) средняя годовая температура увеличилась по тренду с 10,9 до 13,4°C, а среднее годовое количество осадков снизилось с 424 до 388 мм. Поэтому климатические затраты энергии на почвообразование в современных условиях находятся в диапазоне от 900 до 1000 МДж/м<sup>2</sup>год<sup>-1</sup>.

**Результаты.** Оценка углероддепонирующего потенциала для различных по генезису и антропогенной трансформации почв является ключевым вопросом в решении задачи регулирования почвенной секвестрации углерода. Количество стабилизированного и

защищенного от разложения почвенного органического вещества (ОВ) характеризует углеродпротекторную емкость почвы (СРС). Физико-химические взаимодействия ОВ с минеральными частицами почвы, особенно при наличии значительного резерва в почве частиц пыли и глины, – это механизм наиболее надежной стабилизации углерода и его длительной сохранности на сотни лет [22]. Поэтому содержание органического углерода (Сорг) в гранулометрических фракциях пыли и глины с размером частиц  $<0,02$  мм можно считать мерой СРС [15], как и по доле тонкодисперсной фракции минерально-ассоциированного ОВ – частиц  $<0,05$  мм, что было обосновано в более поздней работе [16]. По авторским данным, при анализе распределения гранулометрических фракций по профилю модальных почв установлено, что теснота связи суммы частиц  $<0,05$  мм с суммой частиц  $<0,02$  мм составляет 0,965.

В границах степной зоны по градиенту меридиональности изменяется не только биоклиматический потенциал, но и углеродпротекторная емкость почв, что обусловлено различиями их гранулометрического состава. Считается [23], что каждый генетический тип почвы помимо системы генетических горизонтов характеризуется определяемыми особенностями органофилия и содержания гумуса в нем, которое зависит от гранулометрического состава. В этой связи предложен относительный показатель для типологического сравнения педогенеза – коэффициент профильного накопления гумуса (КПНГ) как соотношение между содержанием гумуса и физической глины (долей частиц  $<0,01$  мм) во всем профиле [23]. Для чернозёмов южных величина КПНГ находится в диапазоне 0,045-0,055, а для темно-каштановых почв варьирует от 0,035 до 0,045, а при использовании модификации КПНГ (по соотношению между содержанием гумуса и физической глины в слое 0-30 см, отнесенному к 10 % последней) эти различия отражаются величинами 0,55-0,66 и 0,45-0,53 соответственно. При сравнении почв степной зоны было показано, что между чернозёмами обыкновенными и темно-каштановыми почвами углеродпротекторная емкость почвы, рассчитанная по методам [15, 16], отличается на  $10 \text{ г Скг}^{-1}$  почвы [22] из-за более низкого содержания у почв сухостепной зоны фракции частиц  $<0,05$  мм и  $<0,02$  мм (на 29% и 26% соответственно).

Тип эпюры распределения Сорг по профилю почв имеет важное значение для оценки углероддепонирующей способности всей почвенной толщи. При условии однородности материнских пород колебания распределении гранулометрических фракций в почвенных профилях до глубины 1,5-2 м можно почти всецело отнести на счёт педогенных процессов, таких как внутрпочвенное оглинивание, лессиваж и их совместное проявление в пахотных почвах и др. При этом наиболее существенное варьирование отмечается для фракций  $<0,001$  мм и  $<0,0001$  мм [24]. Почвы, испытавшие длительные и/или значительные агрогенные нагрузки, отличаются по типу профильного распределения Сорг от своих зональных аналогов. Если математическое описание вертикальной дифференциации Сорг в почвах под целиной и лесом наиболее адекватно соответствует экспоненциальному одностороннему распределению, то для профиля длительно используемых в земледелии почв подходит нормальное одностороннее распределение [25].

Обоснование меры СРС по содержанию фракций, начиная от крупной пыли и мелче, как это предложено в работах [15, 16], опирается на результаты обобщения широкой выборки по разным типам почв, их местоположений и видам хозяйственного использования. Важно отметить, что при анализе связи содержания Сорг с углеродпротекторной емкостью почв в трансзональном разрезе [22] во всех подтипах черноземов отмечалось превышение Сорг над величинами СРС в 1,2-1,5 раза, что объясняется более высокой ролью в этих почвах иных механизмов сохранения углерода, в числе которых назовем, прежде всего, формирование макро- и микроагрегатов. Так, при обосновании структуры «гранулометрического показателя структурности» ( $P_c$ ) А.Ф. Вадюниной было отмечено [26, с. 62], что для гумусных почв следует, прежде всего, учитывать те частицы, которые принимают активное участие в коагуляции (ил и большую часть мелкой пыли, т.е. фракции частиц  $<0,005$  мм). И потому при расчете показателя структурности ( $P_c$ ) содержание указанной фракции соотносится с долей частиц более крупной размерности (средней и крупной пыли, т.е. частиц  $>0,005$  мм, но  $<0,05$  мм).

Рассмотрим выше представленные предложения по учету фракций различной размерности в более узком географическом аспекте, применительно к черноземам и темно-каштановым почвам степной зоны. Обобщение исходных данных [27] по опорным разрезам степной зоны ( $n=19$ ) показывает, что теснота связи между содержанием Сорг и долей фракций  $<0,005$  мм несколько выше, чем с долей фракций  $<0,05$  мм ( $r=0,48$  и  $0,46$  соответственно). Однако при этом особенно важно отметить, что в диапазоне изменения Сорг от 1 до 3,5% при увеличении

доли частиц размерностью <0,05 мм от 90 % и выше наблюдается положительный тренд в депонировании минерально-ассоциированного органического вещества (углерода) (рисунок 1).

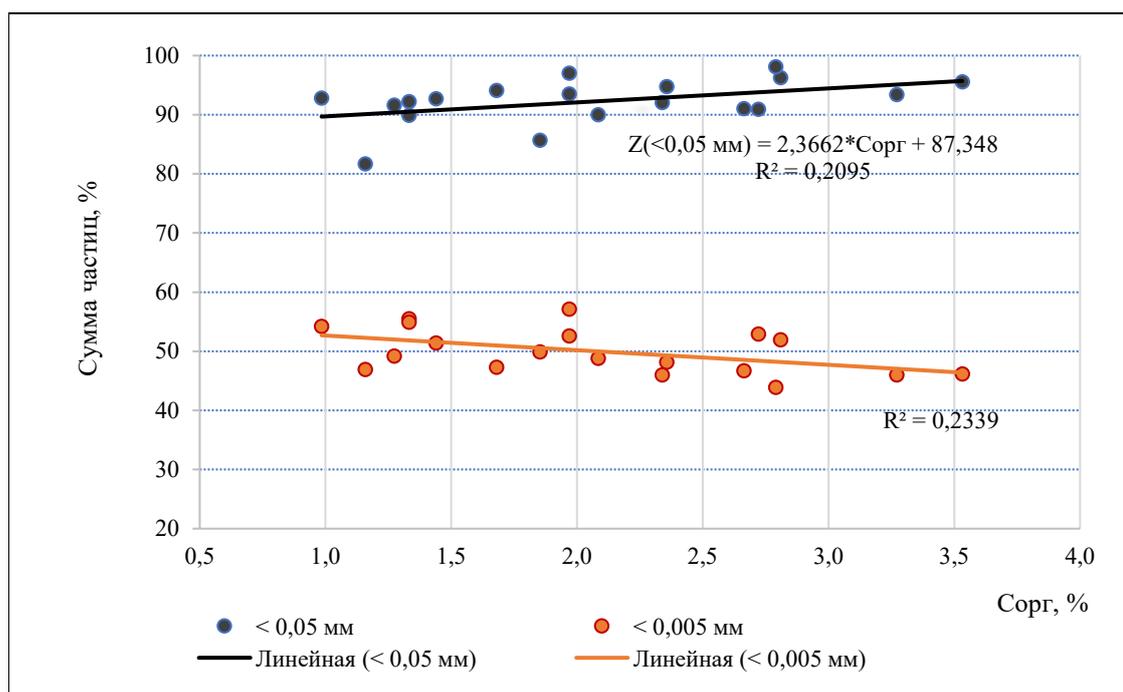


Рисунок 1. Изменение содержания Сорг по мере увеличения суммы фракций <0,05 мм и <0,005 мм в почвах степной зоны.

В этой связи характерно, что по этим же данным между содержанием Сорг и величинами гранулометрического показателя структурности ( $P_C$ ) установлена отрицательная (обратная) регрессия, которая выражается уравнением:  $Сорг = -0,0225P_C + 4,7984$  (при величине достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,428$ ). С учетом того, что между содержанием Сорг в почвах степной зоны ( $Сорг = 2,15 \pm 0,39\%$  ( $P = 0,95$ ))) и долей частиц размером 0,05-0,01 мм ( $Z = 32,2 \pm 2,8\%$  ( $P = 0,95$ ))) устанавливается довольно надежная степенная зависимость вида:  $Сорг = 0,0025Z^{1,9332}$  (при величине достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,734$ ), можно считать, что частицами этого диапазона во многом определяется углерододепонирующий потенциал степных почв.

Результаты многолетних исследований содержания ОБ в постагрогенных горизонтах почв разновременных залежей и соответствующих (по глубине) слоях целинных аналогов (таблица 1) позволяют увидеть характерные особенности формирования количества и качества ОБ, обусловленные биоклиматическими различиями двух регионов степной зоны Северного Причерноморья. Определение класса гранулометрического состава, основанное на данных метода пипетки Н.А. Качинского, предполагает использование содержания физической глины, т.е. суммы частиц <0,01 мм, тогда как зарубежные классификации (USDA/FAO, ISSS, SSEW) основаны на определении частиц размером <0,02 мм. Однако между содержанием суммы частиц <0,02 мм и <0,01 мм установлена высокая теснота связи. Данные, представленные в таблице 1, показывают, что в гранулометрическом составе доля физической глины – ФГ (частиц <0,01 мм) различается, как между изучаемыми регионами степной зоны, так и между членами агросерий почв.

Во всех членах агросерий почв Северо-Западного Крыма содержание Сорг выше (от 15 до 36 относительных %), чем в агросерии почв Нижнего Побужья. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, с различиями величин климатических затрат энергии на почвообразование в двух изучаемых регионах (от 28 до 70 МДж/м<sup>2</sup>год<sup>-1</sup>). Более благоприятные биоклиматические условия на территории Северо-Западного Крыма по сравнению с сухостепной зоной в Нижнем Побужье отражаются в гор. А эталонных почв в более высокой их гумусированности, в высокой обогащенности гумуса азотом при определенной фульватизации, что отражается в гуматно-фульватном типе гумуса. Во-вторых, хотя доля частиц <0,01 мм и углеродпротекторная емкость почвы (СРС-1) закономерно увеличивается от целинных почв к старозалежным почвам и молодым залежам в обоих регионах, однако у крымских почв эта ёмкость во всех вариантах почв выше. Особенности углеродпротекторной ёмкости

постагрогенных почв свидетельствуют о том, что агропочвы длительного земледельческого использования изменяют свой гранулометрический состав с наиболее заметным увеличением доли частиц размерностью, начиная с фракции крупной пыли и мельче.

Таблица 1

Обобщенные данные по содержанию и качественным характеристикам органического вещества в горизонте А агросерий почв степной зоны Нижнего Побужья и Северо-Западного Крыма

Почвы	Целина	Залежь (n·100 лет)	Залежь (n·10 лет)
	Нижнее Побужье		
Показатели:			
Сорг (среднее), %	2,07	1,80	1,44
Сорг ( $\bar{X} \pm t_{0,05}S\bar{x}$ ), %	1,86÷2,29	1,61÷1,99	1,14÷1,74
Сорг (n)	17	22	16
С:N	9,4	8,4	7,9
С <sub>ГК</sub> :С <sub>ФК</sub>	2,9	2,6	2,2
ФГ, %	34	43	48
СРС-1, г С кг <sup>-1</sup>	21,8	25,4	27,8
Показатели:	Северо-Западный Крым		
Сорг (среднее), %	2,43	2,80	1,98
Сорг ( $\bar{X} \pm t_{0,05}S\bar{x}$ ), %	2,22÷2,65	2,54÷3,05	1,72÷2,25
Сорг (n)	27	54	17
С:N	7,3	8,8	9,0
С <sub>ГК</sub> :С <sub>ФК</sub>	0,99	1,4	1,6
ФГ, %	44	46	54
СРС-1, г С кг <sup>-1</sup>	25,9	27,0	30,4

Вероятно, как более значительной степенью выпаханности, диагностируемой по степени гумусирования почв, так и спецификой биоклиматических условий, можно объяснить больший разрыв между содержанием Сорг у постагрогенных почв, недавно пахавшихся и их местными эталонами, в Побужье, если сравнивать с объектами в Крыму. Не только в лесостепных почвах, как это показано ранее на примере эволюционного тренда серых лесных почв к черноземам [28], наблюдается процесс проградации пахотных почв, что отражается в росте их гумусированности во времени, но и, в определённых условиях, этот процесс может проявляться и в степных почвах. Примечательно, что старозалежные почвы Северо-Западного Крыма более гумусированные, чем их целинные аналоги. Помимо более высокой эффективности процессов ренатурации в длительном залежном режиме (при инертности целинных почв на климатическую изменчивость), также внесли свой вклад унаследованные признаки проградации старопахотных почв. Так, при изучении агроземов, различающихся длительностью земледельческой нагрузки почв в сельскохозяйственной округе Керкинитиды, было установлено, что старопахотные почвы отличались более высокими значениями бонитета (на 5-6 баллов) по сравнению с почвами нового периода освоения.

Путем обобщения данных, накопленных автором в результате почвенно-генетических исследований в Северо-Западном Крыму, получена выборка из определений Сорг>0,6% и соответствующих данных гранулометрического состава, включая долю фракции <0,05 мм, необходимой для расчёта углеродпротекторной ёмкости (СРС-4) по уравнению [16]. Эти результаты представлены в виде эмпирической зависимости и её аппроксимации в виде экспоненты на *рисунке 2*.

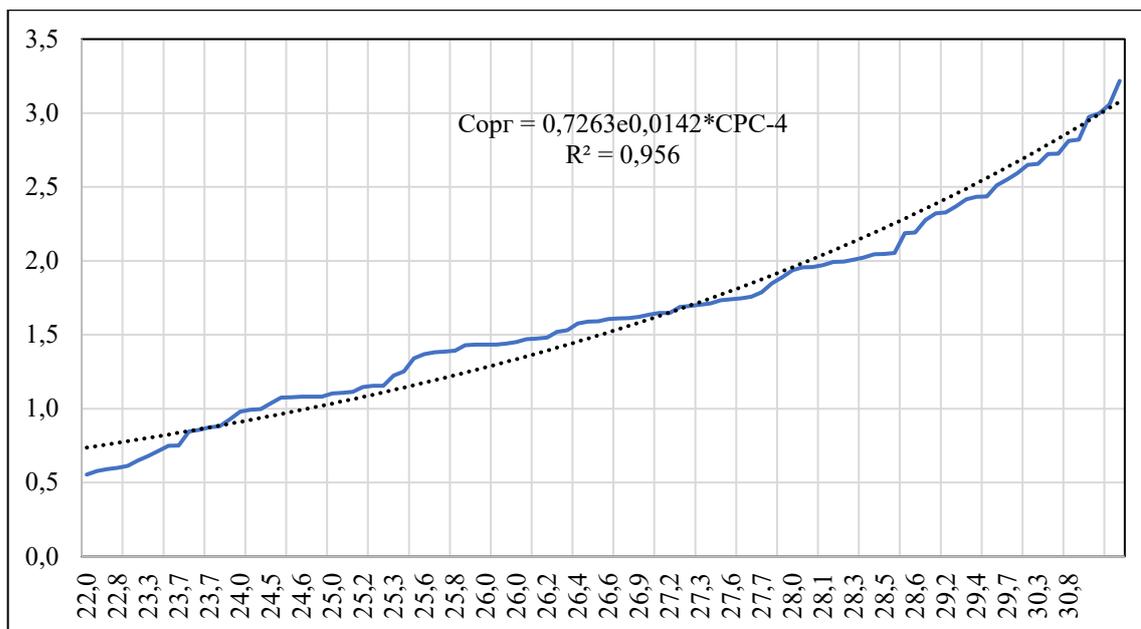


Рисунок 2. Интегральная кривая зависимости содержания органического углерода (Corg) в почвах Северо-Западного Крыма от углеродпротекторной ёмкости по уравнению [16], учитывающему долю гранулометрических частиц <0,05 мм (CPC-4).

Статистическая обработка анализируемой совокупности ( $n=97$ ) показала, что на 95%-ном уровне вероятности средние величины Corg и CPC-4 находятся в интервале  $1,64 \pm 0,13$  ( $1,5 \div 1,8$ )% и  $26,50 \pm 0,43$  ( $26,1 \div 26,9$ ) г С кг<sup>-1</sup> почвы соответственно. При общем характере экспоненциальной зависимости содержания органического углерода от углеродпротекторной ёмкости почв, представленной на *рисунке 2*, наиболее значительные темпы роста содержания Corg (от 2 и более %) наблюдаются при увеличении величины углеродпротекторной ёмкости CPC-4 от 28 г С кг<sup>-1</sup> почвы.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00169, <https://rscf.ru/project/23-17-00169/>.*

### Список литературы

1. Лисецкий Ф.Н., Смекалова Т.Н., Маринина О.А. Биогеохимические особенности разновременных залежей в степной зоне // Сибирский экологический журнал. 2016. № 3. С. 436-448. <http://dx.doi.org/10.15372/SEJ20160314>.
2. Артищев В.Е. Роль постселитебных геосистем в восстановлении связности экологических сетей // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44. № 4. С. 474-482.
3. Лисецкий Ф.Н., Голушов П.В., Судник-Войцковская Б., Мойсиенко И.И. Особенности микроразнообразия почв и растительности по катенам курганных сооружений // Сибирский экологический журнал. 2014. Т. 21. № 3. С. 373-388.
4. Рябинина Н.О. Историко-культурные ландшафты и развитие природоохранного каркаса степей юго-востока Русской равнины // Вопросы степеведения. 2019. № 15. С. 273-276.
5. Левыкин С.В., Чибилев А.А., Казачков Г.В., Яковлев И.Г., Грудинин Д.А. Проблемы восстановления зональных степных экосистем на постцелинном пространстве России и Казахстана // Степной бюллетень. 2013. № 37. С. 5-8.
6. Brosseder U., Miller B. K. 5 The Eurasian Steppe: Local Agents and their Participation in Global Networks // Handbook of Ancient Afro-Eurasian Economies: Volume 3: Frontier-Zone Processes and Transimperial Exchange. 2023. P. 271-293.
7. Нечаева Т.В. Залежные земли России: распространение, агроэкологическое состояние и перспективы использования (обзор) // Почвы и окружающая среда. 2023. Т. 6. № 2. e215. <http://dx.doi.org/10.31251/pos.v6i2.215>.
8. Лисецкий Ф.Н., Голушов П.В. Эколого-почвенные исследования для целей ренатурации нарушенных земель // Генезис, география и экология почв: Сб. науч. тр. Междунар. конф., Львов, 16-18 сентября 1999 года. Львов: Львовский государственный университет им. Ивана Франко, 1999. С. 180-182.
9. Лисецкий Ф.Н. Оценка влияния антропогенного фактора на интенсивность процесса гумусообразования в почвах степной зоны Причерноморья // Повышение эффективности использования

удобрений и плодородия почв в Украинской ССР: Тез. докл. конф., г. Харьков, октябрь 1985 г.). Харьков: Национальный научный центр институт почвоведения и агрохимии имени А. Н. Соколовского, 1985. С. 123-124.

10. Лисецкий Ф.Н. Периодизация антропогенно обусловленной эволюции степных экосистем // Экология. 1992. № 5. С. 17-25.

11. Лисецкий, Ф. Н. Особенности трансформации растительного вещества степных экосистем // Фундаментальные исследования. 2012. № 3-2. С. 245-249.

12. Жуйкова Т.В., Гордеева В.А., Тюркина Е.А. О скорости разложения надземной и подземной фитомассы травянистых растений разных агроботанических групп // Современные проблемы естественных наук и фармации: сб. статей Всерос. науч. конф., Йошкар-Ола, 16-20 мая 2022 года. Вып. 11. Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2022. С. 163-165.

13. Титлянова А.А., Шибарева С.В. Изменение чистой первичной продукции и восстановление запасов углерода в почвах залежей // Почвоведение. 2022. № 4. С. 500-510. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2204013X>.

14. Лисецкий Ф.Н. Автогенная сукцессия степной растительности в постантичных ландшафтах // Экология. 1998. № 4. С. 252-255.

15. Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles // Plant and Soil. 1997. Vol. 191. P. 77-87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>.

16. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils // Plant and Soil. 2002. Vol. 241. P. 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

17. Волобуев В.Р. Введение в энергетику почвообразования. М.: Наука, 1974. 126 с.

18. Крыжицкий С.Д., Буйских С.Б., Бураков А.В., Отрешко В.М. Сельская округа Ольвии. Киев: Наукова думка, 1989. 240 с.

19. Чернозёмы СССР (Украина). М.: Колос, 1981. 256 с.

20. Агроклиматический справочник по Николаевской области. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 104 с.

21. Климатический атлас Крыма / Приложение к научно-практическому дискуссионно-аналитическому сборнику «Вопросы развития Крыма». Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.

22. Когут Б.М., Семенов В.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 103-124. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-103-124>.

23. Полупан М.І., Соловей В.Б., Величко В.А. Коефіцієнт відносної акумуляції гумусу – об'єктивний діагностичний показник еколого-генетичного статусу ґрунтів // Вісник аграрної науки. 2001. Спец. Випуск, липень 2001. С. 32-38.

24. Скрыбина Э.Е. Гранулометрия и коллоиды // Почвы Молдавии. Т. 1. Кишинев: Штиинца, 1984. С. 96-107.

25. Махлин Т.Б., Поляк З.И., Шилихина И.И., Энтензон М.М. Математическая модель профильного распределения гумуса в почве // Почвоведение. 1981. № 6. С. 27-37.

26. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.

27. Атлас почв Украинской ССР. Под ред. Н.К. Крупского и Н.И. Полупана. Киев: Урожай, 1979. 160 с.

28. Бек А.Н. Исследование гумусированности почв в агрохронорядях с использованием наземных средств и данных дистанционного зондирования Земли // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. № 2. С. 210-222. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-2-210-222>.