

**Агропочвоведение и агроэкология**

УДК 631.4

DOI: 10.31857/S250026272301009X, EDN: PEDBEI

**ДЕПОНИРОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ****Л. В. Бойцова, кандидат биологических наук, С. В. Непримерова, Е. Г. Зинчук**Агрофизический научно-исследовательский институт,  
195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14  
E-mail: larisa30.05@mail.ru

Исследование проводили с целью изучения депонирования органического вещества в илстой фракции дерново-подзолистой супесчаной почвы разной степени окультуренности. Объект исследований – дерново-подзолистая супесчаная почва средней (СОК) и высокой (ВОК) степени окультуренности (Ленинградская область). Содержание органического вещества определяли по методу И.В. Тюрина. Илстую фракцию почвы (<1 мкм) выделяли путем седиментации и центрифугирования. Рентгенографический анализ почвенных минералов илстой фракции проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-ЗМ, трубка Си К, режим 30 мА, 30 кВ, от 3,5 до 75 градусов, скорость вращения гониометра 1° в минуту. Достоверно большее ( $p < 0,0001$ ) содержание общего органического углерода в пахотном горизонте ВОК почвы на уровне 28,0 г/кг почвы отмечали в мае и августе. Величина этого показателя была выше, чем в СОК почве, в 2 раза. Достоверно ( $p < 0,01$ ) наибольшее содержание углерода, связанного с илстой фракцией ( $C_{cl}$ ), в течение вегетационного сезона отмечено в ВОК почве – 82,33...97,51 г/кг фракции, что выше, чем в варианте СОК, в 1,2...1,4 раза. Наибольший коэффициент обогащения органическим веществом илстой фракции отмечен в СОК почве, где он был равен 4,08...4,79, в то время как в ВОК почве, величина этого показателя варьировала в диапазоне 2,95...3,69. В среднеокультуренной почве в большей степени в секвестрации органических соединений участвовали диоктаэдрические слюды и хлорит. Между их содержанием и  $C_{cl}$  выявлены достоверные положительные корреляционные связи ( $r = 0,83$ ). В высококультуренной почве аналогичная ситуация отмечена для калиевых полевых шпатов ( $r = 0,99$ ). Для СОК почвы установлена достоверная взаимосвязь содержания  $C_{cl}$  с температурой ( $r = -0,84$ ) и влажностью ( $r = -0,91$ ) почвы. В целом она обладала большей депонирующей способностью, по сравнению с ВОК почвой.

**SEQUESTRATION OF ORGANIC CARBON IN SODDY-PODZOLIC SANDY SOIL****L. V. Boitsova, S. V. Neprimerova, E. G. Zinchuk**Agrophysical Research Institute,  
195220, St. Petersburg, Grazhdansky prosp., 14  
E-mail: larisa30.05@mail.ru

The study was carried out in order to study the deposition of organic matter in the clay fraction of soddy-podzolic sandy loamy soil of varying degrees of cultivation. The object of research is soddy-podzolic sandy loamy soil of medium (MDC) and high (HDC) degree of cultivation (Leningrad region). Determination of organic matter was carried out according to the method of Tyurin I.V. The isolation of the clay fraction of the soil (<1 μm) was carried out using sedimentation and centrifugation. X-ray analysis of soil minerals in the clay fraction was carried out on a DRON-ZM X-ray diffractometer, Cu Kα tube, mode 30 mA, 30 kV, from 3.5 to 75 degrees, goniometer rotation speed 1° per minute. A significantly larger ( $p < 0,0001$ ) amount of total organic carbon in the arable horizon of the HDC of the soil, about 28,0 g/kg of soil, was recorded in May and August, which exceeded the content of total organic carbon in the soil of the MDC by 2 times. The highest absolute values in relation to carbon associated with the clay fraction ( $C_{cl}$ ) during the growing season were significantly ( $p < 0,01$ ) in the soil of the HDC 82,33...97,51 g/kg of the fraction. The excess amounted to 1,2-1,4 times compared with the MDC option. The highest coefficient of enrichment with organic matter of the clay fraction was observed in the MDC soil, where it was 4,08...4,79, while in the HDC soil, its value varied in the range of 2,95...3,69. The predominant depositing role of dioctahedral micas and chlorite in moderately cultivated soil ( $r = 0,83$ ) and potassium feldspars in highly cultivated soil ( $r = 0,99$ ) was revealed. Correlation analysis revealed a significant relationship between the content of  $C_{cl}$  and soil temperature  $r = (-0,84)$ ,  $C_{cl}$  and soil moisture  $r = (-0,91)$  for soil MDC. The MDC soil had the highest depositing capacity compared to the HDC soil.

**Ключевые слова:** илстая фракция, рентгенографический анализ, коэффициент обогащения, степень окультуренности.

**Key words:** clay fraction, X-ray analysis, enrichment factor, degree of cultivation.

Углерод как основная составляющая почвенного органического вещества может находиться в почве в лабильных и стабильных фракциях [1]. Фракция песка связана со свободным или лабильным органическим веществом [2], более стабильная фракция чаще присутствует в иле и пыли [3, 4]. На закрепление органического вещества почвы влияет вид минералов [5], особенно глинистые. Они способствуют поглощению органических и питательных веществ, обеспечивают повышенную буферную способность почвы, снижают доступность органического вещества для деструкторов [6, 7, 8]. Специфичная поверхность каолинита составляет 6...40 м<sup>2</sup>/г, смектита и вермикулита – до 800 м<sup>2</sup>/г [9]. Таким образом, в почвах с высоким содержанием глины

происходит большая иммобилизация органического углерода [10, 11, 12].

Цель исследований – определение влияния степени окультуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы на депонирование углерода.

**Методика.** Работу проводили на стационаре Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (Ленинградская область, Гатчинский район). Отбор образцов осуществляли в мае 2018 г. до начала полевых работ, после чего на участках выращивали яровую ячмень (*Hordeum vulgare* L.), и в течение вегетационного периода 2019 г. в посеве вико-овсяной смеси (вика посевная яровая (*Vicia sativa* L.) сорта Львовский и овес яровой (*Avena sativa* L.) сорта

Боррус в соотношении 30:70 %). Объединённую пробу формировали из индивидуальных, которые отбирали методом конверта с площадок размером 2×2 м с глубины 0...15 см пахотного горизонта дерново-подзолистой супесчаной среднеокультуренной (СОК) и высокоокультуренной (ВОК) почвы по стандартной методике с использованием почвенного бура [13].

На участке СОК органические удобрения не вносили, на участке ВОК в 2003–2012 гг. было внесено 760 т/га навоза крупного рогатого скота, в 2016 г. куриный помет в дозе 70 т/га. Агрохимические показатели среднеокультуренной почвы –  $pH_{KCl}=5,3$ ,  $C_{org}=1,38\%$ ,  $N_{tot}=0,17\%$ ; высокоокультуренной почвы –  $pH_{KCl}=6,4$ ,  $C_{org}^{бщ}=2,78\%$ ,  $N_{tot}=0,28\%$ . Содержание физической глины (частиц < 0,01 мм) составляло соответственно 12...15 % и 19 %.

Среднесуточная температура воздуха в мае 2019 г. составляла 11,4 °С, в июле – 15 °С, в августе – 16 °С, сумма осадков – соответственно 82,9, 172,6 и 60,9 мм. Среднесуточная температура воздуха в мае 2018 г. была равна 14 °С, сумма осадков – 17,1 мм.

Содержание общего органического углерода ( $C_{org}$ ) и углерода, ассоциированного с илстой фракцией ( $C_{ил}$ ) определяли по методу Тюрина [14]. Выделение илстой фракции почвы (<1 мкм) осуществляли с использованием седиментации и центрифугирования по методике, подробно описанной в работе [15]. Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом [14], температуру почвы – с использованием электронных датчиков iButton DS 1921 (Dallas Semiconductor, США), установленных на глубине 10 см. Рентгенографический анализ илстой фракции почвенных минералов проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-ЗМ, трубка Cu K $_{\alpha}$ , режим 30 мА, 30 кВ, от 3,5 до 75°, скорость вращения гониометра 1° в минуту. Для определения минералогического состава образцов использовали стандартные таблицы [16]. Процесс накопления углерода в почве оценивали с использованием коэффициента обогащения углеродом илстой фракции почвы [17].

$E_{soc} = C_{фракции} / C_{org}$   
где  $C_{фракции}$  – содержание углерода, % от массы фракции,  $C_{org}$  – содержание общего органического углерода, % от массы почвы.

Статистическая обработка результатов предусматривала расчет средних, стандартных отклонений и коэффициентов корреляции Пирсона. Достоверность различий между средними оценивали методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) при уровне значимости  $p < 0,05$ .

В мае 2018 г. температура почвы на участке СОК составляла 13,37 °С, ВОК – 12,04 °С, влажность почвы соответственно 4,5 и 5,8 %. В 2019 г. температура варьировала в диапазонах соответственно 12,41...21,97 °С и

11,56...22,09 °С с максимальными значениями в августе, влажность почвы – 6,0...14,5 % с максимумом в середине августа и 8,7...20,8 % с максимумом в середине июля.

**Результаты и обсуждение.** Содержание  $C_{org}$  в мае 2019 г. в варианте СОК было ниже, чем в мае 2018 г., на 10,6 % и  $C_{ил}$  – выше на 5 % (табл. 1), ВОК почве наблюдали обратную картину при этом разница была равна 8,7 и 1,6 %. Вероятно, такое распределение по годам связано с температурой и влажностью почвы, сочетание которых в мае 2019 г. способствовало увеличению биологической активности почвы, по сравнению с маем 2018 г., что привело к изменению содержания  $C_{org}$ . Однако в варианте СОК, где изначально содержание  $C_{org}$  было ниже, чем в варианте ВОК, наблюдался его больший расход. Увеличение содержания  $C_{ил}$  в почве СОК, по сравнению с ВОК, связано с большим содержанием минералов, в этой почве, способствующих закреплению органического вещества.

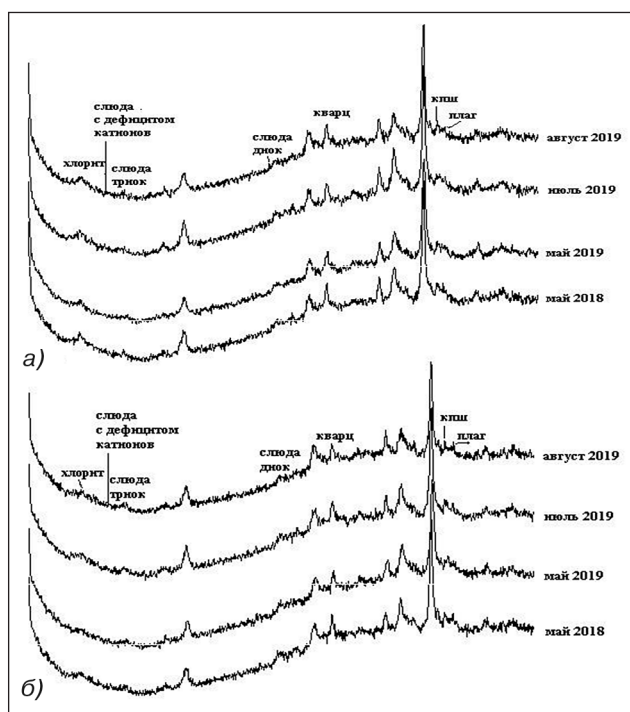
Анализ данных, полученных в 2019 г., продемонстрировал незначительное изменение содержания  $C_{org}$  в обоих вариантах к окончанию периода наблюдений, относительно его начала. При этом достоверно большее количество общего органического углерода в пахотном горизонте ВОК почвы зафиксировано в мае и августе ( $p < 0,0001$ ), в июле наблюдали незначительное уменьшение его содержания. Пахотный горизонт СОК почвы характеризовался максимальной величиной  $C_{org}$  в июле, в мае и августе она оставалась на одном уровне. Можно предположить, что такие изменения в ВОК почве связаны с ее большей биогенностью из-за изначально повышенного содержания органического вещества.

В пахотном горизонте ВОК почвы отмечено достоверно большее содержание  $C_{ил}$  ( $p < 0,01$ ), по сравнению с вариантом СОК. Превышение составило 1,2...1,4 раза. Максимальные величины в обоих вариантах зафиксированы в июле. Вероятно, это связано с увеличением полифенолоксидазной активности почвы [18], в результате сложившихся благоприятных почвенных условий и, как следствие, повышением коэффициента гумификации, который представляет собой отношение содержания полифенолоксидазы и пероксидазы. По нашим неопубликованным данным коэффициент гумификации для почвы СОК в июле составлял 0,41, для ВОК – 0,55, в то время как в мае он был равен 0,28 и 0,35 соответственно. Полифенолоксидаза – почвенный фермент, способствующий накоплению гумусовых веществ, пероксидаза – фермент, участвующий в минерализации органических веществ. Их соотношение зависит от влажностных и температурных условий почвенной среды и влияет на накопление гумусовых веществ в почве. С увеличением полифенолоксидазной активности, вероятно, связано и повышение содержания  $C_{org}$  в почве СОК, по сравнению с почвой ВОК.

Оценивая депонирующую способность илстой фракции почвы по показателю  $E_{soc}$  (см. табл. 1), можно отметить наибольший коэффициент обогащения в СОК почве. Можно предположить, что такая ситуация связана с обогащением илстой фракции устойчивыми органическими соединениями, вследствие их ассоциации с почвенными минералами. Это согласуется с данными, полученными для нативной дерново-подзолистой супесчаной почвы [19]. По результатам рентгенографического анализа СОК почва в большей степени, чем ВОК, обогащена минералами, особенно группы слюд, которые относят к глинистым минералам (табл. 2). Они отличаются большей удельной поверхностью, по сравнению с первичными минералами, что в свою очередь способствует лучшему закреплению и защите от разложения

**Табл. 1. Содержание  $C_{org}$ ,  $C_{ил}$ , значения  $E_{soc}$  в дерново-подзолистой супесчаной почве средней степени и высокой степени окультуренности**

| Год  | Вариант | Период | $C_{org}$ , г/кг почвы | $C_{ил}$ , г/кг фракции | $E_{soc}$ |
|------|---------|--------|------------------------|-------------------------|-----------|
| 2018 | СОК     | май    | 15,54±0,6              | 63,43±1,4               | 4,08      |
|      | ВОК     |        | 25,57±0,8              | 83,65±2,1               | 3,27      |
| 2019 | СОК     | май    | 13,89±0,5              | 66,57±3,0               | 4,79      |
|      |         | июль   | 18,27±0,5              | 73,82±3,1               | 4,04      |
|      |         | август | 14,20±0,1              | 63,44±2,5               | 4,47      |
|      | ВОК     | май    | 27,8±0,3               | 82,33±0,3               | 2,95      |
|      |         | июль   | 26,4±0,7               | 97,51±0,6               | 3,69      |
|      |         | август | 28,0±1,1               | 91,26±0,04              | 3,25      |



**Рентгенограммы дерново-подзолистой супесчаной почвы среднеокультуренной и высокоокультуренной (по горизонтали – угол  $2\theta$  от 3 до 34°, по вертикали – интенсивность пиков,  $\text{имп}\cdot\text{с}^{-1}$ ; подписаны диагностические пики основных минералов – хлорита, слюд с дефицитом катионов, триоктаэдрической и диоктаэдрической, кварца, калиевого полевого шпата и плагиоклаза): а) среднеокультуренная почва Анах, иллитная фракция; б) высокоокультуренная почва Анах, иллитная фракция.**

органических веществ. Уменьшение  $E_{\text{соч}}$  в ВОК почве, вероятно, связано с опережающим накоплением  $C_{\text{орг}}$  по сравнению со скоростью фиксации углерода иллитной фракцией. Возможно, это происходит из-за увеличения содержания легкой фракции органического вещества, что наблюдается при внесении навоза и помета [20]. Кроме того, можно предположить, что для закрепления органических частиц, дополнительным источником которых служило органическое удобрение, было недостаточно поверхности сорбции минералов в составе ее иллитной фракции [21, 22].

Достоверная взаимосвязь депонирования  $C_{\text{ил}}$  с температурой ( $r=-0,84$ ) и влажностью ( $r=-0,91$ ) почвы была отмечена в варианте СОК. Между температурой,

влажностью почвы и накоплением  $C_{\text{орг}}$  отмечена средняя достоверная корреляция для обоих вариантов. При этом для СОК почвы она была отрицательной (соответственно  $r=-0,59$  и  $-0,55$ ), для ВОК положительной ( $r=0,62$  и  $0,53$ ).

Рентгенографический анализ минералогического состава иллитной фракции выявил (см. рисунок), что к основным минералам иллитных фракций исследуемых почв относятся первичные почвенные минералы (калиевые полевые шпаты, плагиоклазы и кварц).

Количество хлоритов (качественное содержание минералов можно оценить по интенсивности пика на рентгенограмме, которая зависит не только от количества, но и от структуры конкретного минерала, поэтому количественное сравнение содержания разных минералов в одном образце не возможно, доступно только сравнение содержания одного и того же минерала в разных образцах) в иллитной фракции среднеокультуренной почвы было значительно больше, чем в высокоокультуренной. При этом к августу 2019 г. зафиксировано уменьшение количества хлоритов в СОК почве, а в ВОК, напротив, увеличение. Рост их содержания в иллитной фракции связан с разрушением хлоритов крупных фракций и более интенсивным преобразованием других минералов в хлориты [23]. Это указывает на деградацию минеральной части почвы.

Слюды в почве присутствуют в трех модификациях: с дефицитом катионов, триоктаэдрическая и диоктаэдрическая. Диоктаэдрические слюды представлены в почве в наибольшем количестве (см. табл. 2). Слюды триоктаэдрические менее устойчивы, чем диоктаэдрические [24], в процессе их преобразования образуются слюды с дефицитом катионов. Общее содержание слюд иллитной фракции в почвах обеих степеней окультуренности к августу 2019 г. выросло, по сравнению с весной 2018 г. и 2019 г. Это происходит в результате разрушения более крупных фракций. В почве СОК, отобранной в июле 2019 г., зафиксировано максимальное количество диоктаэдрической слюды в иллитной фракции при минимальном содержании калиевых полевых шпатов, что, возможно, связано с серицизацией полевых шпатов (преобразованием зерен полевого шпата в серицит – диоктаэдрическую слюду). Вероятно, при дефиците калия в почве активизируется химическое выветривание минералов, поэтому такой процесс наблюдается в СОК почве и не зафиксирован в ВОК почве.

Кварц считается самым устойчивым минералом в почве, но и он подвержен изменениям [25]. В иллитной фракции высокоокультуренной почвы наблюдали уменьшение количества кварца с максимального в мае 2018 г. к минимальному в августе 2019 г., а в среднеокультуренной – в августе 2019 г. величина этого показателя находилась на уровне мая 2018 г., а в мае и июле 2019 г.

**Табл. 2. Минералогическая таблица диагностических пиков основных минералов почвы,  $\text{имп}\cdot\text{с}^{-1}$**

| Месяц (год)                      | Хлорит | Слюда с дефицитом катионов | Слюда триоктаэдрическая | Слюда диоктаэдрическая | Кварц | КПШ | Плагиокл |
|----------------------------------|--------|----------------------------|-------------------------|------------------------|-------|-----|----------|
| <b>Среднеокультуренная почва</b> |        |                            |                         |                        |       |     |          |
| Май (2018)                       | 85     | 61                         | 77                      | 382                    | 674   | 754 | 566      |
| Май (2019)                       | 94     | 57                         | 42                      | 275                    | 571   | 690 | 468      |
| Июль (2019)                      | 96     | 54                         | 52                      | 430                    | 527   | 503 | 536      |
| Август (2019)                    | 69     | 64                         | 92                      | 321                    | 672   | 569 | 525      |
| <b>Высокоокультуренная почва</b> |        |                            |                         |                        |       |     |          |
| Май (2018)                       | 48     | 60                         | 57                      | 162                    | 649   | 437 | 566      |
| Май (2019)                       | 53     | 34                         | 56                      | 302                    | 573   | 406 | 596      |
| Июль (2019)                      | 54     | 44                         | 52                      | 263                    | 597   | 641 | 639      |
| Август (2019)                    | 62     | 59                         | 76                      | 311                    | 522   | 562 | 872      |

она понижалась (см. табл. 2). Уменьшение содержания кварца в илистой фракции объясняется его разрушением, растения могут извлекать необходимый для их развития кремний даже из такого устойчивого минерала. Однако это основной минерал в изучаемых почвах, его много во всех фракциях, в результате илстая фракция пополняется благодаря измельчению более крупных фракций.

Калиевые полевые шпаты (КПШ) могут использоваться растениями как дополнительный источник калия при его недостатке в почве. В высококультуренной почве мае 2018 и 2019 гг. содержание КПШ в илистой фракции было меньше, чем в среднекультуренной. Однако в июле и августе 2019 г. илстая фракция ВОК почвы обогащалась этим минералом, а СОК почвы, напротив, обеднялась (см. табл. 2). Скорее всего, первое связано с измельчением минералов крупных фракций, так как в ВОК почве более агрессивные почвенные растворы, стимулирующие процессы разрушения крупных фракций минералов, а второе – с интенсивным разрушением минералов илистой фракции растениями, в СОК почве, вероятно, недостаточно калия для роста растений, которые используют его из минеральной составляющей почвы.

Плагиоклазы содержат в кристаллической решетке кальций, они выветриваются легче, чем КПШ, и могут служить источником этого элемента для растений в случае его дефицита. Изначально, в мае 2018 г. содержание плагиоклазов в илистой фракции почв обеих степеней окультуренности находилось на одном уровне. В 2019 г. в СОК почве наблюдали уменьшение содержания плагиоклазов к окончанию вегетационного периода, в ВОК – увеличение (см. табл. 2). Этот факт, объясняется теми же причинами, что и изменение содержания калиевых полевых шпатов в течение сезона. А именно тем, что недостаток необходимых для роста растений элементов в СОК почве приводит к разрушению минералов в тонких фракциях, а в ВОК почве такого недостатка нет, поэтому илстая фракция обогащается благодаря разрушению более крупных фракций. Естественно, оба процесса происходят во всех почвах, но более интенсивно разрушение минералов илистой фракции идет в СОК почве, а крупных фракций – в ВОК. В СОК почве слюда диоктаэдрическая и хлорит участвовали в секвестрации органических соединений в большей степени, чем другие изученные минералы. Между их содержанием и  $S_{ил}$  выявлены достоверные положительные корреляционные связи ( $r = 0,83$ ). В почве ВОК установлены достоверные положительные корреляционные связи между  $S_{ил}$  и содержанием калиевых полевых шпатов ( $r = 0,99$ ).

**Выводы.** Таким образом, наибольшим абсолютным количеством углерода, ассоциированного с илистой фракцией почв, в течение вегетационного сезона характеризуется высококультуренная почва. Самый высокий коэффициент обогащения органическим веществом илистой фракции отмечен в среднекультуренной почве.

В среднекультуренной почве преимущественную депонирующую роль играют диоктаэдрические слюды и хлориты, в высококультуренной – калиевые полевые шпаты.

Температура и влажность почвы оказывают значимое влияние на накопление общего органического углерода в почве в обоих вариантах опыта, а также органического углерода в илистой фракции среднекультуренной почвы.

## Литература

1. Hot regions of labile and stable soil organic carbon in Germany – Spatial variability and driving factors /

- C. Vos, A. Jaconi, A. Jacobs, et al. // *Soil*. 2018. Vol. 4. P. 153–167. doi: 10.5194/soil-4-153-2018.
2. Carbon saturation in the silt and clay particles in soils with contrasting Mineralogy / F. Matus, E. Garrido, C. Hidalgo, et al. // *Terra Latinoamericana*. 2016. Vol. 34. P. 311–319.
3. Distribution of organic carbon in different soil fraction in ecosystems of central Amazonia / J.D. O. Marques, F.J. Luizao, W.G. Teixeira, et al. // *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2015. Vol. 39 (1). P. 2–9. doi: 10.1590/01000683rbcsc20150142.
4. Латышева Л.А. Роль органического вещества илистой фракции в динамике качественного состава гумуса буроземов острова Рейнеке // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2015. № 3 (31). С. 17–26. doi: 10.17223/19988591/31/2.
5. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy / M. Singh, B. Sarkar, S. Sarkar, et al. // *Advances in Agronomy*. 2017. Vol. 148. P. 38–84. doi: 10.1016/bs.agron.2017.11.001.
6. Ванюшина А.Я., Травникова Л.С. Органо-минеральные взаимодействия в почвах (обзор литературы) // *Почвоведение*. 2003. №4. С. 418–428.
7. Травникова Л.С., Титова Н.А., Шаймухаметов М.Ш. Роль продуктов взаимодействия органической и минеральной составляющих в генезисе и плодородии почв // *Почвоведение*. 1992. № 10. С. 81 – 96.
8. Dynamic inter actions at the mineral–organic matter interface / M. Kleber, I.C. Bourg, E.K. Coward, et al. // *Nat Rev Earth Environ*. 2021. Vol. 2. P. 402–421. doi: 10.1038/s43017-021-00162-y.
9. The sorption of organic carbon onto differing clay minerals in the presence and absence of hydrous iron oxide / A. Saidy, R. Smernik, J. Baldock, et al. // *Geoderma*. 2013. Vol. 209–210. P. 15–21.
10. The role of clay content and mineral surface area for soil organic carbon storage in an arable toposequence / S.A. Schweizer, C.W. Mueller, C. Höschel, et al. // *Biogeochemistry*. 2021. Vol. 156. P. 401–420.
11. Козыт Б.М., Семенов В.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2020. Вып. 102. С. 103–124. doi: 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124.
12. Gougoulas C., Clark J. M., Shaw L. J. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems // *J Sci Food Agric*. 2014. Vol. 94(12). P. 2362–2371. doi: 10.1002/jsfa.6577.
13. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 419 с.
14. Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Учение о почвенном гумусе. М.: ЕЭ Медиа, 2012. С. 290.
15. Растворова О. Г. Физика почв (практическое руководство). 1983. Л.: ЛГУ, 195 с.
16. Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов / под ред. Г. Брауна (перевод под ред. Франк-Каменецкого В. А.). М: Мир, 1965. 600 с.
17. Christensen B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates // *Advances in Soil Science*. 1992. Vol. 20(1). 90 p.
18. Изменчивость полифенолоксидазной и пероксидазной активности агродерново-подзолистой почвы разной окультуренности с биоуглем / Е.Я. Рижия, Л.В. Бойцова, В.Е. Вертебный и др. // *Сельскохозяй-*

- ственная биология. 2022. Т. 57. № 3. С. 476-485. doi: 10.15389/agrobiology.2022.3.476rus.
19. Бойцова Л.В., Зинчук Е.Г., Непримерова С.В. Исследование секвестрации органического вещества в почвах разной степени гидроморфизма // Проблемы агрохимии и экологии. 2017. № 4. С. 48-53.
  20. Балашов Е.В., Бурова А.В., Банкина Т.А. Сезонная динамика водопрочных агрегатов в зависимости от содержания соединений углерода и биологической активности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. 2010. Вып. 3. С. 125-133.
  21. Бойцова Л.В., Непримерова С.В. Секвестрирование органического вещества в дерново-подзолистой супесчаной почве // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2018. №6. С. 24-27. doi: 10.30850/vrsn/2018/6/24-27.
  22. Stability and storage of soil organic carbon in a heavy-textured Karst soil from south-eastern Australia / A. E. Hobley, G. R. Willgoose, S. Frisia, et al. // Soil Research. 2014. Vol. 52(5). P. 476-482. doi: 10.1071/SR13296.
  23. Чижикова Н.П., Варламов Е.Б., Савич В.И. Поведение минералов при внесении различных доз органических удобрений в агродерново-подзолистой почве. // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2014. Вып. 76. С.91-110.
  24. Толпешта И.И., Соколова Т.А., Изосимова Ю.Г. Краткострочные изменения биотита различных гранулометрических фракций в подзолистой почве в полевом модельном эксперименте // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1211-1224.
  25. Изменение гранитного щебня при длительном выращивании растений в регулируемых условиях / Е. И. Ермаков, Т. С. Зверева, О. В. Рыбальченко и др. // Доклады Российской академии. 1998. № 4. С. 20-22.

Поступила в редакцию 14.09.2022

После доработки 24.10.2022

Принята к публикации 30.11.2022