

**ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВ НА СТАБИЛИЗАЦИЮ В НИХ
ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА**

Л. В. Бойцова, С. В. Непримерова, Е. Г. Зинчук

*ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14
E-mail: larisa30.05@mail.ru**Поступила в редакцию 28 августа 2019 г., принята к печати 21 ноября 2019 г.*

В статье рассматривается влияние минералогического состава дерново-подзолистых супесчаных почв на стабилизацию в них органического углерода. Изучены профили следующих почв: профили 1 (ДСП), 2 (ДСП1) – дерново-сильнопodzолистая почва; профили 3 (ДПГ), 4 (ДПГ1) – дерново-подзолистая глееватая почва; профиль 5 (ДСППГ) – дерново-сильнопodzолистая поверхностно-глееватая почва. Содержание общего органического углерода ($C_{орг}$) и углерода, ассоциированного с илом ($C_{ил}$), определялось по методу Тюрина. Илистая фракция почвы после обработки проб ультразвуком выделена методом седиментации с последующим центрифугированием. Рентгенографический анализ позволил определить качественный состав почвенных минералов илистой фракции. Съемка производилась на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М (трубка Cu K_{α} , режим 30 мА, 30 кВ, от 3,5 до 75 градусов, скорость вращения гониометра – 1 градус в минуту). В результате проведенного исследования установлено, что наибольшим содержанием $C_{орг}$ характеризуется верхний горизонт профиля ДСП1 ($p < 0,0001$) (37,23 г С кг⁻¹). В пахотном горизонте профиля ДПГ1 обнаружено минимальное содержание $C_{орг}$ (17,93 г С кг⁻¹). В горизонте А2В всех изученных профилей отмечено резкое падение содержания $C_{орг}$ (от 6 до 24 раз) с последующим его снижением вниз по профилю. Максимальное количество $C_{ил}$ установлено в пахотном горизонте профиля ДПГ1 ($p < 0,002$) (92,27 г С кг⁻¹).

Вследствие наличия в оглеенных горизонтах почвы значительного количества восстановленного железа, которое вступает в соединения с органическим веществом почвы, данные горизонты отличались большей способностью к накоплению углерода в илистой фракции по сравнению с аналогичными генетическими горизонтами без признаков оглеения. Максимальные значения E_{soc} зафиксированы в горизонтах АВ и В оглеенных почв, где они находились в диапазоне 6,7–53,3.

Преобладающим минералом в изученных почвах является кварц, который в большей степени участвовал в стабилизации органических соединений в илистой фракции. Вследствие своего строения кварц удерживает частицы органического вещества лишь на поверхности, не образуя с органическими фрагментами тесных связей, что приводит к быстрой минерализации органического вещества почвы. Также установлено положительное влияние плагиоклаза на секвестрацию углерода в илистой фракции. Плагиоклаз относится к полевым шпатам, которые в раздробленном состоянии могут приобрести такую же емкость поглощения, как и глинистые минералы, в результате чего они будут образовывать тесную связь с органическими коллоидами. Остальные минералы не оказали заметного влияния на накопление углерода в илистой фракции изученных почв.

Ключевые слова: стабилизация углерода, минералогический состав, дерново-подзолистые почвы, илистая фракция.

INFLUENCE OF SOIL MINERALOGICAL COMPOSITION ON ORGANIC CARBON STABILIZATION

L. V. Boitsova, S. V. Neprimerova, E. G. Zinchuk

*Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220
E-mail: larisa30.05@mail.ru*

The paper considers the influence of the mineralogical composition of sod-podzolic sandy loam soils on the stabilization of organic carbon in the soils. The profiles of the following soils were studied: profiles 1 (SSP), 2 (SSP1) – sod-strongly podzolic soil; profiles 3 (GSP), 4 (GSP1) – gley sod-podzolic soil; profile 5 (SSPSG) – sod-strongly podzolic surface-gley soil.

The content of total organic carbon and carbon associated with clay was determined by the Tyurin method. The clay fraction of the soil after exposing the samples to ultrasound was isolated by sedimentation followed by centrifugation. X-ray analysis was used to determine the qualitative composition of soil minerals of the clay fraction. The survey was carried out on a DRON-3M X-ray diffractometer (Cu K_{α} tube, 30 mA, 30 kV mode, from 3.5 to 75 degrees, goniometer rotation speed –1 degree per minute). As a result of the study, it was found that the upper horizon of SSP1 is characterized by the highest level of $C_{орг}$ ($p < 0.0001$) (37.23 g C kg⁻¹). A sharp drop in the $C_{орг}$ content (from 6 to 24 times) was noted in the A2B horizon of all profiles with its further

decrease down the profile. The maximum amount of C_{clay} was found in the arable horizon of the GSP1 profile ($p < 0.002$) ($92.27 \text{ g C kg}^{-1}$).

Due to the presence of large amount of reduced iron, which can easily react with the soil organic matter, the gley soil horizons were characterized by a greater ability to accumulate carbon in the clay fraction compared to the similar genetic horizons without signs of gleying. The maximum values of E_{soc} were recorded for horizons AB and B of the gley soils, where they were in the range of 6.7–53.3.

Quartz is the predominant mineral in the studied soils. It was more involved in the stabilization of organic compounds in the clay fraction. Owing to its structure, quartz retains particles of organic matter only on its surface, without forming close bonds with organic fragments, which leads to rapid mineralization of soil organic matter. It was also found that plagioclase had a positive effect on carbon sequestration in the clay fraction. Plagioclase refers to feldspars, which in a crushed state can acquire the same absorption capacity as clay minerals, and as a result they can form a close bond with organic colloids. Other minerals did not significantly affect the accumulation of carbon in the clay fraction of the studied soils.

Key words: carbon stabilization, mineralogical composition, sod-podzolic soils, clay fraction.

ВВЕДЕНИЕ

Стабилизация углерода в почве является важным фактором, оказывающим влияние на изменение климата. Органическое вещество, поступая в почву, переходит в инертное состояние и стабилизируется, что способствует уменьшению выбросов CO_2 в атмосферу (Семенов и др., 2009; Paul, 2016; Voitsova et al., 2018). Накопление органического углерода и его стабилизация (секвестрация) в илистой фракции относятся к экологическим функциям почв, по которым определяется их качество (Балашов и др., 2013).

Илистая фракция, а также минералы, входящие в ее состав, оказывают влияние на способность почв защищать органический углерод от микробиологической деструкции (Бойцова, Непримерова, 2018; Kalbitz, 2008; Barré et al., 2014; Voitsova, 2015). Эффективность такой защиты зависит от вида минералов, сорбирующих органические вещества почвы (Singh, 2018).

Глинистые минералы относятся к водным слоистым силикатам. В их состав входят следующие группы минералов: каолинита, монтмориллонита, хлорита. Глинистые минералы имеют внешнюю и внутреннюю сорбционную поверхность. Внутренняя поверхность обусловлена особенностями структуры минерала. Все глинистые минералы имеют слоистую кристаллическую решетку, вследствие чего они отличаются высокой внутренней поверхностью и в целом высокой специфической поверхностью (суммарно внутренняя и внешняя поверхность) (Ванюшина, Травникова, 2003). Специфичная поверхность глин составляет $6\text{--}40 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$ для каолинита (Saidy, 2013) и до $800 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$ для смектита и вермикулита (Robert, Chenu, 1992). Молекулы гуматов и фульватов из-за большого размера и особой формы не проникают в межслоевые промежутки глинистых минералов, а фиксируются на поверхности посредством адгезии и когезии. В межслоевые промежутки могут проникать лишь низкомолекулярные продукты разложения органических веществ (Горбунов, 1974).

Кварц и полевые шпаты имеют внешнюю сорбционную поверхность, которая зависит от степени дисперсности минерала. Они отличаются низкой специфической поверхностью (от 2 до $4 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$), что не способствуют длительному закреплению органических фрагментов. На поверхности кварцевых зерен органическое вещество фиксируется в виде соединений с полуторными окислами. Однако полевые шпаты в раздробленном состоянии могут приобрести такую же емкость поглощения, как и монтмориллонит, в результате чего они будут образовывать тесную связь с органическими коллоидами.

Слюды относятся к слоистым алюмосиликатам. Благодаря своему строению они обладают высокой сорбционной способностью по отношению к органическому веществу почвы.

В целом фиксация гуматов и фульватов зависит от химического состава поверхностных слоев коллоидов, в частности количества железа и алюминия, дисперсности минералов, наличия несиликатных полуторных окислов и ряда других факторов.

Цель работы заключалась в оценке влияния минералогического состава дерново-подзолистых почв на стабилизацию органического углерода в их профиле.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для исследования были отобраны при выполнении почвенного картирования сельскохозяйственных земель Меньковской опытной станции в 2011–2012 гг. Согласно классификации 1977 г., все изученные почвы относятся к дерново-подзолистым (Егоров и др., 1977). Изучались профили следующих почв: дерново-сильноподзолистая почва – профиль 1 (ДСП), профиль 2 (ДСП1); дерново-подзолистая глееватая почва – профиль 3 (ДПГ), профиль 4 (ДПГ1); дерново-сильноподзолистая поверхностно-глееватая почва – профиль 5 (ДСППГ) — подстилается моренными отложениями и отличается большой пестротой минералогического состава (Моисеев и др., 2013). Сведения о строении профилей изученных почв приведены в табл.

Таблица. Стрoение почвенных профилей

Почва									
ДСП		ДСП1		ДПГ		ДПГ1		ДСППГ	
горизонт	глубина, см	горизонт	глубина, см	горизонт	глубина, см	горизонт	глубина, см	горизонт	глубина, см
A1	0–35	A1	0–35	Ап	0–36	Ап	0–21	Ап	0–36
A2B	35–55	A2B	35–48	A2Bg	36–52	A2Bg	21–40	A2Bg	36–63
B	55–86	Bg	48–89	BgFe	52–70	Bg	40–61	B	63–88
BC	86–130	B2g	89–120	B1C	70–90	BC	61–86	BC	88–120
		BC	120–170	B2C	90–130	C	86–120		

Профиль 1 заложен на сенокосе, профили 2–5 – на пашне, при этом профиль 2 заложен на распаханном сельскохозяйственном участке, а 3 и 4 – в посевах ячменя (ячмень 1, 2), профиль 5 – в посевах пшеницы.

Содержание $C_{\text{общ}}$ определялось по методу Тюрина (Растворова и др., 1995). Выделение илистой фракции почвы осуществлялось по следующей методике. В образец почвы массой 200 г, пропущенный через сито с диаметром ячеек 1 мм, добавлялась дистиллированная вода, далее полученная смесь диспергировалась при помощи ультразвуковой установки BRANSON 450, затем образец переносился в сосуд и подвергался седиментации. Для осаждения илистой фракции почвы использовалась центрифуга JANETZKI S70, количество оборотов составляло $6 \cdot 1000 \text{ мин}^{-1}$, время центрифугирования – 15 мин. Полученный ил высушивался на воздухе при комнатной температуре.

Качественный состав почвенных минералов илистой фракции определялся при помощи рентгенографического анализа. Для этого 20 мг почвы растиралось в агатовой ступке с добавлением 4–5 капель дистиллированной воды, далее взвесь помещалась на покрывное стекло и высушивалась при комнатной

температуре. Съемка производилась с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-ЗМ, трубка Cu K_{α} , режим 30 мА, 30 кV, от 3,5 до 75 градусов, скорость вращения гониометра – 1 градус в минуту. Для определения образцов использовались стандартные таблицы (Рентгенография..., 1983).

Оценка процесса накопления углерода в почве производилась при помощи коэффициента обогащения углеродом илистой фракции почвы (Christensen, 1992): $E_{\text{soc}} = C \text{ фракции} / C_{\text{орг}}$, где $C \text{ фракции}$ – содержание углерода во фракции, выраженное в % от массы фракции; $C_{\text{общ}}$ – содержание общего органического углерода, выраженное в % от массы почвы. Если E_{soc} больше 1 или равен ей, то происходит обогащение органического вещества почвы, если E_{soc} меньше 1, то наблюдается его истощение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольшее количество общего органического углерода обнаружено в верхнем горизонте профиля ДСП1 ($p < 0,0001$) ($37,23 \text{ г С кг}^{-1}$). В пахотном горизонте профиля ДПГ1 отмечено минимальное содержание $C_{\text{орг}}$ ($17,93 \text{ г С кг}^{-1}$) (рис. 1)

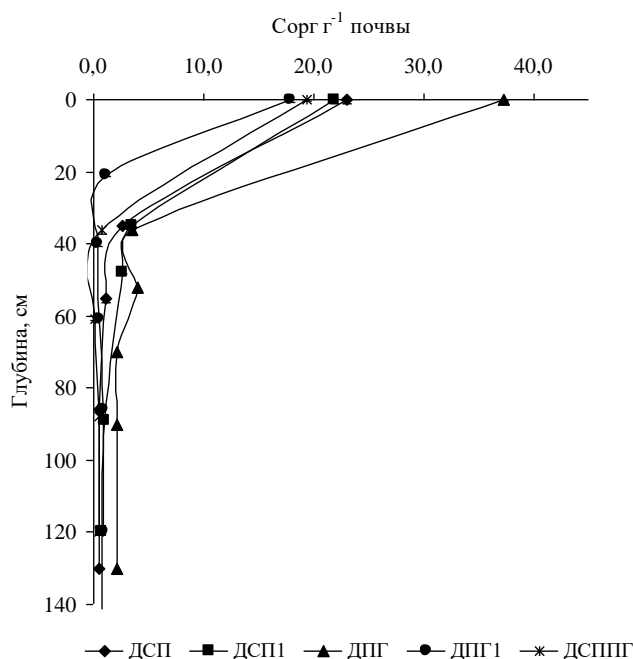


Рис. 1. Содержание общего органического углерода в дерново-подзолистых почвах: ДСП и ДСП1 – дерново-сильноподзолистая почва; ДПГ и ДПГ1 – дерново-подзолистая глееватая почва; ДСППГ – дерново-сильноподзолистая поверхностно-глееватая почва

Установлено резкое падение содержания $C_{орг}$ в горизонте А2В: от 6 раз в профиле ДСП1 до 24 в профиле ДСППГ. В горизонте В всех изученных профилей наблюдалось дальнейшее снижение содержания $C_{орг}$, однако уже не такое резкое, за исключением профиля ДПГ, где отмечено незначительное увеличение количества $C_{орг}$, что, вероятно, связано с ожезненностью данного горизонта (дополнительное количество железа связывает

органическое вещество в органо-минеральные комплексы и удерживает его от миграции по профилю). В горизонте ВС обнаружено незначительное количество $C_{орг}$ (от 0,5 до 2,2 г С кг⁻¹ почвы).

Наибольшее количество органического углерода, ассоциированного с илистой фракцией, отмечено в пахотном горизонте профиля ДПГ1 ($p < 0,002$), где оно составляло 92,27 г С кг⁻¹ (рис. 2).

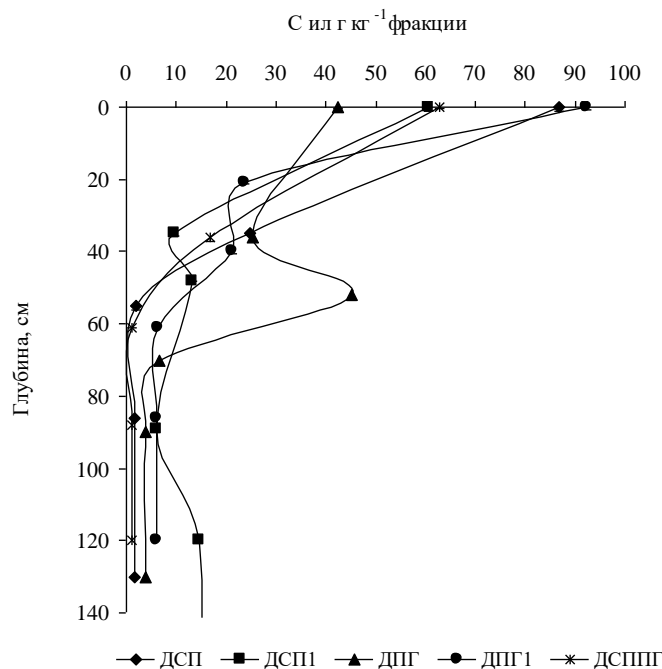


Рис. 2. Содержание органического углерода, ассоциированного с илистой фракцией, в дерново-подзолистых почвах: ДСП и ДСП1 – дерново-сильноподзолистая почва; ДПГ и ДПГ1 – дерново-подзолистая глееватая почва; ДСППГ – дерново-сильноподзолистая поверхностно-глееватая почва

Пахотный горизонт профиля ДПГ характеризовался минимальным содержанием $C_{ил}$ (42,55 г С кг⁻¹). Содержание $C_{ил}$ в основном снижалось вниз по профилю. Так, в горизонте А2В наблюдалось снижение от 1,7 раза до 6,4 раза. В оглеенных горизонтах В всех изученных профилей содержалось большее количество углерода, ассоциированного с илом, по сравнению с неоглеенными. Так, если в оглеенных горизонтах содержание $C_{ил}$ составляло 6–23,6 г С кг⁻¹ фракции, а в ВgFe профиля ДПГ доходило до 45,3 г С кг⁻¹ фракции, то в подобных горизонтах без признаков оглеения оно равнялось 1–2 г С кг⁻¹ фракции. Процесс глееобразования характеризуется наличием большого количества восстановленного железа, которое вступает в соединения с органическим веществом почвы. Это обеспечивает защиту органического вещества от микробиологической деструкции, что, в свою очередь, способствует его накоплению в илистой фракции оглеенных горизонтов (Бойцова и др., 2017). Кроме того,

гуминовые кислоты в виде кислых солей железа, алюминия и некоторых микроэлементов мигрируют из верхнего горизонта в иллювиальный, где происходит их насыщение поливалентными катионами, способствующими снижению их растворимости, а также их закреплению в указанной части профиля (Панасин, Рымаренко, 2004). Вероятно, накопление углерода в илистой фракции оглеенных горизонтов связано также с тем, что в процессе оглеения происходит утяжеление гранулометрического состава вследствие диспергации минеральных частиц. В результате этого увеличивается поверхность сорбции для фрагментов органического вещества, что способствует их закреплению.

Фактор обогащения (E_{soc}) илистой фракции органическим углеродом варьируется в верхнем горизонте в диапазоне 1,14–5,14, что свидетельствует о накоплении органического углерода в илистой фракции изученных почв (рис. 3)

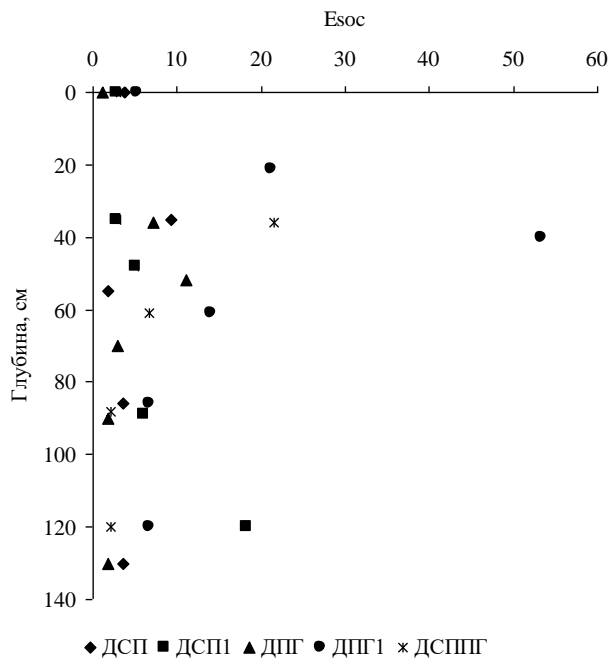


Рис. 3. Значения коэффициента обогащения (E_{soc}) в дерново-подзолистых почвах: ДСП и ДСП1 – дерново-сильноподзолистая почва; ДПГ и ДПГ1 – дерново-подзолистая глееватая почва; ДСППГ – дерново-сильноподзолистая поверхностно-глееватая почва

Высокое отношение содержания $C_{ил}$ к содержанию $C_{орг}$ (5,14) в почве пахотного горизонта профиля ДПГ1 свидетельствует о том, что здесь илистая фракция обогащена органическими соединениями, которые являются более устойчивыми благодаря их ассоциации с почвенными минералами (Rumpel et al., 2004). Ранее при изучении микростроения данной почвы обнаружено наличие органо-железистых пленок вокруг зерен минералов и трещинам спайности (Непримерова, 2008). Огленные горизонты всех изученных почв отличались большей способностью к накоплению углерода в илистой фракции по сравнению с аналогичными генетическими горизонтами без признаков оглеения. Это объясняется ролью железа, которая отмечена выше.

Минералогический состав илистой фракции является довольно сложным. В нем присутствуют кварц, полевые шпаты, слюды, хлорит, а также смешаннослойные минералы и каолинит в незначительных количествах. Установлено, что в илистых фракциях почв всех изученных профилей в наибольшем количестве представлены первичные почвенные минералы – калиевые полевые шпаты ($964\text{--}371 \text{ имп } c^{-1}$), плагиоклазы ($890\text{--}221 \text{ имп } c^{-1}$) и кварц ($711\text{--}372 \text{ имп } c^{-1}$) (рис. 4). Достоверных различий в распределении данных минералов не обнаружено. Максимальное содержание кварца отмечено в верхнем горизонте всех профилей, кроме 2. Данный минерал устойчив к выветриванию, поэтому в пахотном горизонте, где все минералы подвергаются наибольшему воздействию окружающей среды, вследствие чего они разрушаются и выносятся из горизонта, относительное содержание кварца выше по сравнению с другими минералами. В профилях ДСП и

ДПГ1 содержание кварца снижается с глубиной, в профиле ДСППГ – уменьшается до горизонта В, а в нижележащих горизонтах незначительно возрастает. В профилях ДСП1 и ДПГ не выявлено закономерностей в распределении кварца по глубине. По-видимому, это связано с неравномерным минералогическим составом исходной морены, на которой образовались данные почвы.

В профилях ДСП и ДСП1 минимальное содержание калиевых полевых шпатов отмечено в горизонте А1, в остальных профилях они присутствовали в горизонте А2В. Максимальное количество калиевых полевых шпатов зафиксировано в горизонте Вg профилей ДСП и ДПГ1, а также в горизонте В профиля ДСППГ.

Минимальное количество плагиоклаза отмечено в горизонте А2В всех профилей, кроме 2, максимальное количество – в горизонте В всех профилей, кроме 5.

Хлорит в профилях 1, 4 и 5 накапливался в горизонте А2В, далее вниз по профилю его содержание снижалось. В профилях 2 и 3 наблюдалось постепенное увеличение содержания хлорита с глубиной.

Установлено увеличение содержания всех слюд с глубиной, что свидетельствует об их разрушении в пахотном горизонте и миграции вниз по профилю. Количество триоктаэдрических слюд повышалось с глубиной во всех профилях, кроме 5, при этом их содержание незначительно уменьшалось в нижнем горизонте. В профиле ДСППГ максимальное содержание триоктаэдрических слюд отмечено в горизонте А2В, далее происходило его снижение с глубиной. В пахотном горизонте профилей 1, 2 и 3 установлено минимальное содержание диоктаэдрических слюд, в горизонте А2В оно

относительно увеличилось, а с глубиной снова снизилось. Иной характер их распределения прослеживался в профилях 4 (минимальное количество в горизонте Bg) и 5 (минимальное количество в горизонте A2B). Слюды с дефицитом межслоевых катионов в изученных разрезах присутствовали в незначительном количестве. Закономерностей в их распределении по профилям 3 и 4 не выявлено, в профилях 1, 2 и 5 обнаружено незначительное увеличение их содержания с глубиной.

Кварц по сравнению с другими первичными минералами в большей степени участвовал в секвестрации органических соединений в почве профилей 1, 4 и 5. Выявлены достоверные положительные корреляционные связи между его

содержанием и $C_{ил}$ ($r = 0,73-0,92$). Установлено положительное влияние плагиоклаза ($r = 0,17-0,43$) на секвестрацию углерода в илистой фракции почвы профилей 2, 3, 4 и 5. Среди силикатов и алюмосиликатов в наибольшем количестве в почве представлены диоктаэдрические слюды ($517-154 \text{ имп с}^{-1}$). Установлены слабые положительные корреляционные связи между содержанием $C_{ил}$ и слюд с дефицитом катионов ($r = 0,31$), а также между содержанием $C_{ил}$ и диоктаэдрических слюд ($r = 0,35$) в почве профиля ДПГ1, в остальных почвенных профилях данные связи являлись отрицательными. Хлорит и другие минералы не оказали заметного влияния на накопление углерода в илистой фракции изученных почв.

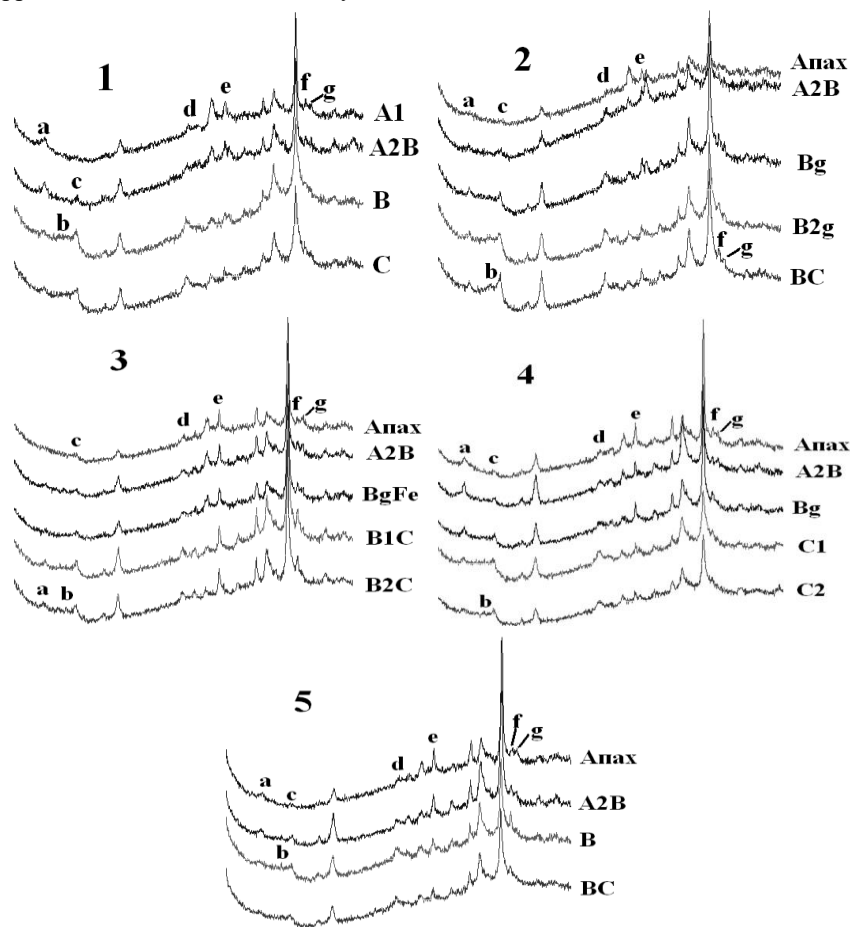


Рис. 4. Рентгенодифрактограммы илистой фракции дерново-подзолистых почв.

1, 2 – дерново-сильноподзолистая почва; 3, 4 – дерново-подзолистая глееватая почва; 5 – дерново-сильноподзолистая поверхностно-глееватая почва. Буквы на графике (ось абсцисс) – диагностические пики минералов: **a** – хлорит; **b** – слюда с дефицитом межслоевых катионов; **c** – триоктаэдрическая слюда; **d** – диоктаэдрическая слюда; **e** – кварц; **f** – калиевый полевошпат; **g** – плагиоклаз

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольшее количество общего органического углерода обнаружено в верхнем горизонте профиля ДСП1 ($p < 0,0001$), где оно составило $37,23 \text{ г С кг}^{-1}$, в пахотном горизонте профиля ДПГ1 установлено минимальное содержание $C_{орг}$ ($17,93 \text{ г С кг}^{-1}$). В горизонте A2B всех изученных профилей наблюдалось резкое падение содержания общего органического углерода (от 6 до 24 раз) с последующим его снижением вниз по профилю.

Оглеенные горизонты почвы благодаря наличию значительного количества восстановленного железа, которое вступает в соединения с органическим веществом почвы, отличались большей способностью к накоплению углерода в илистой фракции по сравнению с аналогичными генетическими горизонтами без признаков оглеения. В оглеенных

горизонтах количество углерода, ассоциированного с илом, было в 6–12 раз больше (в горизонте BgFe – в 23 раза больше), чем в подобных горизонтах, не имеющих признаков оглеения. Максимальное количество органического углерода, ассоциированного с илистой фракцией, обнаружено в пахотном горизонте профиля ДПГ1 ($p < 0,002$), где оно составило $92,27 \text{ г С кг}^{-1}$. Максимальные значения E_{soc} зафиксированы в горизонтах АВ и В оглеенных почв, где они находились в диапазоне 6,7–53,3.

Изученные почвы характеризуются легким гранулометрическим составом. Преобладающим минералом в них является кварц, который в большей степени участвовал в стабилизации органических соединений в илистой фракции. Также выявлено положительное влияние плагиоклаза на секвестрацию углерода в илистой фракции. Остальные минералы не оказали заметного влияния на накопление углерода в илистой фракции изученных почв.

Список литературы

- Балашов Е. В., Моисеев К. Г., Рижия Е. Я., Бойцова Л. В., Гончаров В. Д., Зинчук Е. Г., Бучкина Н. П. Комплексная система мониторинга агрофизического состояния почв на основе результатов почвенного картирования и исследования эмиссии парниковых газов // Агрофизика. 2013. № 4 (12). С. 1–11.
- 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.
- 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
- Ванюшина А. Я., Травникова Л. С. Органо-минеральные взаимодействия в почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2003. № 4. С. 418–428.
- Горбунов Н. И. Минералогия и коллоидная химия почв. М.: Наука, 1974. 316 с.
- Егоров В. В., Фридланд В. М., Иванова Е. Н., Розов Н. Н. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
- Моисеев К. Г., Гончаров В. Д., Зинчук Е. Г., Рижия Е. Я., Бойцова Л. В., Гуринов П. Д., Старцев А. С., Пищик В. Н. База данных почвенного покрова Меньковского филиала ГНУ АФИ Россельхозакадемии (структура почвенного покрова, геоморфологическое строение, физические и геохимические свойства почв) // Свидетельство о государственной регистрации базы № 2013620682. Заявка № 2013620301. Дата регистрации 06 июня 2013 г.
- Непримерова С. В. Изменение микростроения дерново-подзолистой почвы при внесении органических удобрений / в сб.: Гумусное состояние почв. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. С. 64–65.
- Панасин В. И., Рымаренко Д. А. Гумус и плодородие почв Калининградской области: Монография. Калининград: Изд-во КГУ, 2004. 220 с.
- Растворова О. Г., Андреев Д. П., Гагарина Э. И., Касаткина Г. А., Федорова Н. Н. Химический анализ почв. СПб.: СПбГУ, 1995. 254 с.
- Рентгенография основных типов породообразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты) / Под ред. В. А. Франк-Каменецкого. Л.: Недра, 1983.
- Семенов В. М., Иванникова Л. А., Тулина А. С. Стабилизация органического вещества в почве // Агрохимия. 2009. № 10. С. 77–96.
- Barré P., Fernandez-Ugalde O., Virto I., Velde B., Chenu C. Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete knowledge and exciting prospects // Geoderma, 2014, December, v. 235–236, pp. 382–395. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.07.029
- Boitsova L. V. Zinzuk E. G., Neprimerova S. V., Balashov E. V. Distribution of total and clay-associated organic matter in profiles of arable loamy sand Spodosol // Folia Oecologica, v. 42, no. 1, pp. 1–9.
- Christensen B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates // Advances in Soil Science, v. 20(1), 1992, 90 p.
- Kalbitz K., Scheu S., Eusterhues K., Leinweber P. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry // J. Plant Nutr. Soil Sci., 2008, no. 171, pp. 61–82.
- Paul A. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization // Soil Biology & Biochemistry, 2016, v. 98, pp. 109–126.
- Robert M., Chenu C. Interactions between soil minerals and microorganisms // Soil Biochemistry, 1992, v. 7, pp. 307–404.
- Rumpel C., Eusterhues K., Kögel-Knabner I. Location and chemical composition of stabilized organic carbon in topsoil and subsoil horizons of two acid forest soils // Soil Biology and Biochemistry, 2004, is. 1, v. 36, pp. 177–190.
- Singh M., Sarkar B., Sarkar S., Churchman J., Bolan N., Mandal S., Menon M., Purakayastha T. J., Beerling D. J. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy // Advances in Agronomy, 2017, January. DOI: 10.1016/bs.agron.2017.11.001.
- Saidy A., Smernik R., Baldock J., Kaiser K., Sanderman J. The sorption of organic carbon onto differing clay minerals in the presence and absence of hydrous iron oxide // Geoderma, 2013, v. 209–210, pp. 15–21.

References

- Balashov E. V., Moiseev K. G., Rizhiia E. Ia., Boitsova L. V., Goncharov V. D., Zinchuk E. G., Buchkina N. P. Kompleksnaia sistema monitoringa agrofizicheskogo sostoianiia pochv na osnove rezul'tatov pochvennogo kartirovaniia i issledovaniia emissii parnikovykh gazov. [A comprehensive system for monitoring the agrophysical state of soils based on the results of soil mapping and research on greenhouse gas emissions] // *Agrofizika*, no. 4(12), 2013, pp. 1–11.
- Boitsova L. V., Zinchuk E. G., Neprimerova S. V. Issledovanie sekvestratsii organicheskogo veshchestva v pochvakh raznoi stepeni gidromorfizma [The study of sequestration of organic matter in soils of varying degrees of hydromorphism] // *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2017, no. 4, pp. 48–53.
- Boitsova L. V., Zinchuk E. G., Neprimerova S. V. Vliianie raznykh vidov zemlepol'zovaniia na nakoplenie organicheskogo veshchestva v dernovo-podzolistykh pochvakh. [The influence of different types of land use on the accumulation of organic matter in sod-podzolic soils] // *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2018, no. 3, pp. 45–50.
- Boitsova L. V., Neprimerova S. V. Sekvestrirovaniie organicheskogo veshchestva v dernovo-podzolistoi supeschanoi pochve. [Sequestration of organic matter in sod-podzolic sandy loamy soil] // *Vestnik Rossiiskoi sel'skokhoziaistvennoi nauki*, 2018, no. 6, pp. 24–27. DOI:10.30850/vrsn/2018/6/24-27
- Vaniushina A.Ia., Travnikova L.S. Organo-mineral'nye vzaimodeistviia v pochvakh (obzor literatury). [Organic-mineral interactions in soils (literature review)] // *Pochvovedenie*, 2003, no. 4, pp. 418–428.
- Gorbunov N. I. *Mineralogiia i kolloidnaia khimiia pochv*. [Mineralogy and colloidal chemistry of soils]. Moscow: Nauka, 1974. 316 p.
- Egorov V. V., Fridland V. M., Ivanova E. N., Rozov N. N. *Klassifikatsiia i diagnostika pochv SSSR*. [Classification and soil diagnostics of the USSR]. Moscow: Kolos, 1977. 221 p.
- Moiseev K. G., Goncharov V. D., Zinchuk E. G., Rizhiia E. Ia., Boitsova L. V., Gurin P. D., Startsev A. S., Pishchik V. N. *Baza dannykh pochvennogo pokrova Men'kovskogo filiala GNU AFI Rossel'khozakademii (struktura pochvennogo pokrova, geomorfologicheskoe stroenie, fizicheskie i geokhimicheskie svoistva pochv)*. [Database of soil cover of the Menkovsky branch of the GNU AFI of the Russian Agricultural Academy (soil structure, geomorphological structure, physical and geochemical properties of soils)] // Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy №2013620682. Zaiavka №2013620301. Data registratsii 06 iunია 2013 goda. [Certificate of state registration of the base № 2013620682. Application No. 2013620301. Registration date June 06, 2013].
- Neprimerova S. V. Izmenenie mikrostroeniia dernovo-podzolistoi pochvy pri vnesenii organicheskikh udobrenii. V sb. *Gumusnoe sostoianie pochv*. [Humus condition of soils] Saint-Peterburg: Publishing House St. Petersburg State Agrarian University, pp. 64–65.
- Panasin V. I., Rymarenko D. A. *Gumus i plodorodie pochv Kaliningradskoi oblasti: Monografiia*. [Humus and soil fertility in the Kaliningrad region: Monograph]. Kaliningrad: KSU Publishing House, 2004. 220 p.
- Rastvorova O. G., Andreev D. P., Gagarina E. I., Kasatkina G. A., Fedorova N. N. // *Khimicheskii analiz pochv*. [Chemical analysis of soils]. Saint-Petersburg: Publishing house St. Petersburg State University, 1995. 254 p.
- Rentgenografiia osnovnykh tipov porodoobrazuiushchikh mineralov (sloistye i karkasnye silikaty)*. [X-ray diffraction of the main types of rock-forming minerals (layered and framework silicates)]. Pod red. Frank-Kamenetskogo V. A. Leningrad: Nedra, 1983.
- Semenov V. M., Ivannikova L. A., Tulina A. S. Stabilizatsiia organicheskogo veshchestva v pochve. [Stabilization of organic matter in the soil] // *Agrokhimiiia*, 2009, no. 10, pp. 77–96.
- Barré P., Fernandez-Ugalde O., Virto I., Velde B., Chenu C. Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete knowledge and exciting prospects // *Geoderma*, 2014, December, v. 235–236, pp. 382–395. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.07.029.
- Boitsova L. V., Zinchuk E. G., Neprimerova S. V., Balashov E. V. Distribution of total and clay-associated organic matter in profiles of arable loamy sand Spodosol // *Folia Oecologica*, v. 42, no. 1, pp. 1–9.
- Christensen B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates // *Advances in Soil Science*, v. 20(1), 1992, 90 p.
- Kalbitz K., Scheu S., Eusterhues K., Leinweber P. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry // *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2008, no. 171, pp. 61–82.
- Paul A. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization // *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, v. 98, pp. 109–126.
- Robert M., Chenu C. Interactions between soil minerals and microorganisms // *Soil Biochemistry*, 1992, v. 7, pp. 307–404.
- Rumpel C., Eusterhues K., Kögel-Knabner I. Location and chemical composition of stabilized organic carbon in topsoil and subsoil horizons of two acid forest soils // *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, is. 1, v. 36, pp. 177–190.
- Singh M., Sarkar B., Sarkar S., Churchman J., Bolan N., Mandal S., Menon M., Purakayastha T. J., Beerling D. J. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy // *Advances in Agronomy*, 2017, January. DOI: 10.1016/bs.agron.2017.11.001.
- Saidy A., Smernik R., Baldock J., Kaiser K., Sanderman J. The sorption of organic carbon onto differing clay minerals in the presence and absence of hydrous iron oxide // *Geoderma*, 2013, v. 209–210, pp. 15–21.