

Оценка запасов органического углерода (SOC) и потенциал его секвестрации в черноземных почвах Самарского Заволжья

О. В. Рухович¹, доктор биологических наук, профессор, заместитель директора по научной работе

Н. М. Троц², доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий

кафедрой «Агрохимия, почвоведение и агроэкология»

В. Б. Троц², доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Землеустройство и лесное дело»

Л. С. Шарая¹, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник

А. А. Бокова², аспирант

¹ ФГБНУ «ВНИИ агрохимии»

127434 г. Москва, ул. Прянишникова, 31 А

² ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет»

446442 Самарская область, г. Кинель, пгт Усть-Кинельский, ул. Учебная-2

✉ troz_shi@mail.ru

Резюме. Проведено измерение запасов почвенного органического углерода (ПОУ) на территории Самарского аграрного карбонового полигона. Исследования проводили в Кинельском и Похвистневском районе Самарской области. Для статистических сравнений и расчета модели C_{org} с характеристиками рельефа и плотностью почвы использовали методы линейной множественной регрессии. Данные о высотах земной поверхности взяты из глобальных матриц высот (МВ) НАСА SRTM30 и преобразованы в матрицу высот земной поверхности в проекции Каврайского с разрешением 600 м. Результаты, полученные в рамках данного подхода, представляют собой матрицы предсказанных характеристик агроэкосистемы. Содержание органического углерода возрастает на пологих склонах восточной экспозиции и накапливается в вытянутых формах рельефа и на выпуклых отрогах. При этом все выявленные связи являются статистически значимыми. Сравнение выраженных пологих склонов с менее пологими в выборке (33 % точек) дает разницу ПОУ в 26,2 %. Запасы углерода в Похвистневском районе в значительной степени определяются аккумуляционной кривизной и килевыми формами на южных склонах. Сравнение склонов с отрицательными и положительными КА и килевых форм на южных склонах (100 % точек) дает разницу ПОУ в 10,8 % и 8,5 %, соответственно.

Ключевые слова: почва, органический углерод, рельеф, моделирование, матрица высот, регрессия, коэффициент детерминации.

Для цитирования: Оценка запасов органического углерода (SOC) и потенциал его секвестрации в черноземных почвах Самарского Заволжья / О. В. Рухович, Н. М. Троц, В. Б. Троц, Л. С. Шарая, А. А. Бокова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 2 (74). С. 72-80. doi:10.18286/1816-4501-2026-2-72-80

Assessment of stocks of organic carbon (soc) and its sequestration potential in black soils of the Samara Trans-volga region

O. V. Rukhovich¹, N. M. Trots², V. B. Trots², L. S. Sharaya¹, A. A. Bokova²

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Agrochemistry"

127434, Moscow, Pryanishnikova St., 31A

² FSBEI HE Samara State Agrarian University

446442 Samara Region, Kinel, Ust-Kinelsky, Uchebnaya St., 2

✉ troz_shi@mail.ru

Abstract. Soil organic carbon (SOC) stocks were measured at Samara Agricultural Carbon Test Site. The study was conducted in Kinel'sky and Pokhvistnevsky districts of the Samara region. Linear multiple regression methods were used for statistical comparisons and to calculate the C_{org} model with terrain characteristics and soil density. Surface elevation data were taken from NASA SRTM30 global elevation matrices (GEMs) and transformed into a surface elevation matrix in the Kavraysky projection with a resolution of 600 m. The results obtained using this approach represent matrices of predicted agroecosystem characteristics. Organic carbon content increases on gentle slopes with eastern exposure and accumulates in elongated landforms and on convex spurs. Moreover, all identified relationships are statistically significant. Comparison of pronounced gentle slopes with less gentle ones in the sample (33% of points) yields a SOC_w difference of 26.2%. Carbon stocks in the Pokhvistnevsky district are largely determined by accumulation curvature and keeled soils on the southern slopes. A comparison of slopes with negative and positive CA and keeled soils on the southern slopes (100% of points) yields a difference in SOC_w of 10.8% and 8.5%, respectively.

Keywords: soil, organic carbon, terrain, modeling, height matrix, regression, determination coefficient.

For citation: Assessment of stocks of organic carbon (soc) and its sequestration potential in black soils of the samara trans-volga region / O. V. Rukhovich, N. M. Trots, V. B. Trots, et al. // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.2 (74): 72-80 doi:10.18286/1816-4501-2026-2-72-80

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект FSSS-2024-0022 (регистрационный номер: 1023112900147-4 от 31.01.24).

Введение

Черноземные почвы Самарского Заволжья обладают высокими базовыми запасами органического углерода (SOC), однако подвержены дегумификации из-за интенсивного земледелия. Потенциал секвестрации (накопления) углерода достигается внедрением технологий точного земледелия, «нулевой обработки» (No-till) и внесением органических удобрений, что позволяет перевести почвы из источника в его сток [1].

К ключевым направлениям, угрожающим стабильности накопления углерода в почве в NBP-пуле, относятся в том числе использование земель под пашню (границы планеты 15 %, сегодняшний уровень 11,7 %), химическое загрязнение за счет использования удобрений (допустимый выброс азота в год 0...62 млн. тонн, сейчас 150 млн. тонн, выброс фосфора в год 0...11 млн. тонн, сейчас 22 млн. тонн), изменение климата за счет повышения концентрации углекислого газа. При допустимой планетарной границе CO₂ 0...350 ppm на сегодняшний день зафиксировано 420 ppm [2].

Концентрация атмосферного CO₂ находится в зависимости от агротехнологических приемов, являясь их функцией, в связи с чем необходимо изучать фактор «углекислота» при каждом агроприеме и стараться воздействовать на него в желательном направлении. Увеличение уровня почвенного органического вещества может способствовать снижению углекислого газа, влияющего на изменение климата, поэтому особенно актуальными становятся разработки и испытания технологий природоохранного ресурсосберегающего земледелия на карбоновых полигонах.

Принятие в 2021 г. Федерального Закона «Об ограничении выбросов парниковых газов» и предполагаемое введение в действие в ближайшие годы Европейским Союзом углеродного налога на импортные товары делают все более актуальной проблему учета объемов поглощения углерода на территории РФ [3].

В складывающейся ситуации желательно получить как можно более объективные данные о запасах углерода в различных экосистемах и компонентах экосистем, так как поглощение углерода рассчитывается по разнице между установленными запасами углерода [4] через определенный промежуток времени. Согласно «Методическим указаниям по

количественному определению объема поглощения парниковых газов», утвержденных распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р [5], повторное обследование проводится примерно через 5 лет. Для объективной картины необходимо учесть поглощение углерода разными экосистемами и их компонентами, каким бы незначительным на первый взгляд не казался их вклад в декарбонизацию, включая и те экосистемы, которые пока вообще не учитываются в расчетах.

Цель исследований – оценить потенциал секвестрации углерода в черноземных почвах Самарского аграрного карбонового полигона путем прогнозного моделирования динамики почвенного органического углерода, ГИС-анализе спутниковых данных и цифровых моделей рельефа.

Материалы и методы

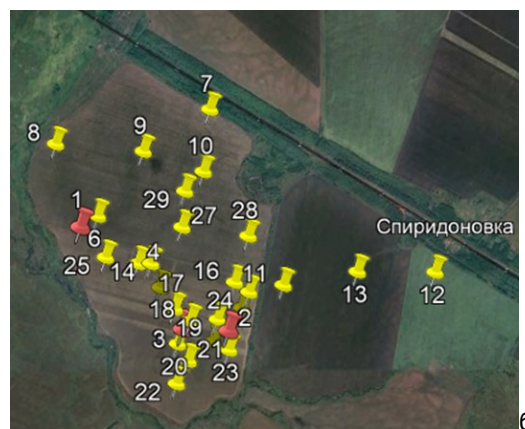
С целью получения объективных данных о состоянии почв исследования проводились с учетом почвенного покрова и рельефа на территории опытных полей, расположенных в центральной агроэкологической зоне, Кинельском и Похвистневском районах Самарской области в 2022-2024 гг.

Оценка запасов органического углерода (SOC) в пахотных почвах была основана на измерении его концентрации, плотности сложения и мощности гумусового горизонта. Точное измерение запасов почвенного органического углерода (ПОУ) предполагает корректный пересчет измеренной концентрации органического вещества почвы в концентрацию углерода, а также измерение объемной плотности d воздушно-сухой почвы и толщины образца h (рис. 1, табл. 1 и 2). Концентрация C может быть измерена анализатором элементов, и тогда пересчет не нужен, но такие измерения занимают много времени, поэтому нужно уменьшать число измеряемых величин, вычисляя остальные.

При определении запаса ПОУ нужны три величины: концентрация органического углерода C (вес. %), плотность воздушно-сухой почвы d (г/см³) и высота горизонта, из которого взят образец почвы h (см). Тогда для данного образца:

$$\text{ПОУ} = 0,1 \cdot d \cdot C \cdot h, \quad (1)$$

где благодаря множителю 0,1 запас ПОУ в образце выражен в кг С/м², а искомый запас ПОУ в данной точке наблюдения есть сумма запасов ПОУ по всем образцам из данного слоя почвы.

Рис. 1. Отбор проб $C_{орг}$: а) в Похвистневском районе; б) в Кинельском районеТаблица 1. Отбор проб $C_{орг}$ в Похвистневском районе Самарской области

№	Координата точки отбора		Гу-мус, %	Плотность, г/см ³
	широта	долгота		
1	53.71616325182867	51.99259096968564	7,8	1,13
2	53.71616325182867	51.99259096968564	8,4	1,06
3	53.71184559271566	51.99430762391177	7,8	1,28
4	53.81225583872718	51.90428924455774	7,5	1,13
5	53.81337072393758	51.90068435564172	5,5	1,28
6	53.82269405727057	51.90540504350793	6,8	1,22
7	53.82304870834342	51.90119933977258	7,4	1,22
8	53.81935090137086	51.92841625161237	6,9	1,17
9	53.82223891750927	51.91948986001081	6,8	1,28
10	53.82150426561444	51.93446731514997	7,1	1,14
11	53.80767013936789	51.94300746865338	8,4	1,26
12	53.80242413944855	51.93682765908307	6,3	1,25
13	53.80658044460656	51.94519615120954	6,8	1,00
14	53.74792325532508	51.96193313546247	5,6	1,07
15	53.7479993877907	51.95742702431745	7,5	1,16
16	53.75155278420047	51.95880911414689	8,8	1,11
17	53.75119394642097	51.95702274301883	8,5	1,29
18	53.75139983055514	51.96201896615094	8,3	1,06
19	53.67842558250091	51.97292650690527	5,5	1,35
20	53.67916930723865	51.97630119218957	6,9	1,20
21	53.67205137968397	51.97501373186243	7,8	1,13
22	53.67756548052577	52.06040108727883	5,3	1,25
23	53.67601723055405	51.97570037737024	7,8	1,31
24	53.73022907909648	51.91814057464181	6,5	1,24

Для статистических сравнений $C_{орг}$ с характеристиками рельефа и плотностью почвы использовали методы линейной множественной регрессии [6, 7, 8].

Для расчета модели $C_{орг}$ данные о высотах земной поверхности взяты из глобальных матриц высот (МВ) NASA SRTM30 и преобразованы в матрицу высот земной поверхности в проекции Каврайского с разрешением 600 м [9,10].

В наших исследованиях наименьшей единицей площади является элемент матрицы размером 600 м×600 м, то есть масштаб, на котором могут быть видны отдельные сельскохозяйственные поля. В то же время вся данная матрица позволяет охватывать всю Самарскую область, так что информация о поведении углерода в пространстве и во времени сохраняется, и этот масштаб позволяет не терять информацию о важных свойствах региональных агроландшафтов [11-13].

Таблица 2. Отбор проб $C_{орг}$ в Кинельском районе Самарской области

№ пп	координаты		Гу-мус, %	Плотность, г/см ³
	широта	долгота		
1	53,19214709935019	50,7355651349177	2,9	1,35
2	53,18509220131259	50,75244812898217	4,2	1,25
3	53,18525572596472	50,74723838312941	3,6	1,18
4	53,18983295568202	50,74226008587365	4,4	1,35
5	53,1867986669738	50,75401926732262	5,5	1,02
6	53,193072721846	50,73762513160011	3,5	1,13
7	53,20037415423156	50,75050003829604	3,7	1,22
8	53,19800903766437	50,73281849976695	3,8	1,35
9	53,19749486462027	50,74286092698979	3,6	1,22
10	53,19610656659482	50,74972754389427	2,6	1,25
11	53,18834375737449	50,75877503299092	3,5	1,10
12	53,18919511645201	50,77609353395771	3,9	1,14
13	53,1892491390756	50,76723503165515	3,4	1,26
14	53,189834	50,743703	4,6	1,13
15	53,188184	50,744733	4,2	1,18
16	53,188545	50,753231	5,5	1,18
17	53,186740	50,746364	6,9	1,25
18	53,185916	50,748167	5,6	1,22
19	53,186019	50,751256	4,4	1,21
20	53,184369	50,746707	4,1	1,21
21	53,183209	50,747909	3,9	1,18
22	53,181675	50,746557	4,4	1,02
23	53,183956	50,752522	4,0	1,06
24	53,187875	50,754861	5,1	1,03
25	53,190246	50,738511	4,0	1,13
26	53,184472	50,750699	3,8	1,22
27	53,192308	50,747265	3,7	1,25
28	53,191689	50,754818	3,9	1,35
29	53,194756	50,747609	4,2	1,12

Для получения матрицы высот из данных SRTM30, расчета МВ, определения статистических связей с помощью корреляции и подхода множественной регрессии, а также для построения карт-матриц характеристик урожая использовалась компьютерная программа «Аналитическая ГИС Эко» [14].

Результаты

Все МВ рассчитываются по матрице высот земной поверхности. Далее методом множественной регрессии проводился анализ статистических связей между МВ и содержанием углерода. В уравнениях множественной регрессии коэффициенты при выделяемых факторах соответствуют относительному вкладу, определяющему пространственные изменения показателя. На основе выявленных связей

рассчитываются карты - прогнозные матрицы исследуемых показателей, в данном случае – перераспределение $C_{орг}$ [15-16]. Три МВ, выбранные по принципу наиболее высокого коэффициента детерминации R^2 (если используется непараметрическая статистика, в которой не предполагается нормальное распределение сравниваемых наборов величин) являются ведущими предикторами пространственной вариабельности показателя урожая. Связь принято считать статистически значимой при уровне значимости $P < 0,01$.

Результат моделирования (рис. 2): шаг решетки 600 м.

Формула регрессии: $X = a \cdot GA + b \cdot MCA + c \cdot F(35,155) + d$, (2)

где $a=5.032687$, $b=2.802104$, $c=0.683119$, $d=2.78996$, морфометрические величины нормированы от 0 до 1; без нормировки $a=1.343036$, $b=0.212212$, $c=0.209106$, $d=-11.61537$;

GA крутизна склонов, градусы;

MCA - площадь сбора, лог.ед.;

F - освещенность (азимут 155, склонение 35 градусов), %.

Для составной величины X: среднее = 5.482692, стандартное отклонение = 1.40174

Ранговый коэффициент корреляции Спирмана $r_s = 0.80904$ ($P < 1e-06$)

r_s описывает тесноту, а P – значимость связи. Ведущий предиктор – крутизна склонов.

Содержание $C_{орг}$ возрастает на пологих склонах восточной экспозиции, он накапливается в вытянутых формах рельефа и на выпуклых отрогах.

Результаты, полученные в рамках этого подхода, представляют собой матрицы предсказанных характеристик агроэкосистемы. Эти данные могут служить обширной количественной основой для прогнозирования изменений в экосистеме с течением времени.

Все выявленные связи являются статистически значимыми. Их использование позволит в дальнейшем исследовании более глубоко систематизировать внутренние взаимосвязи в экосистеме на основе количественных подходов, в которых обязательным условием является указание статистической достоверности полученных результатов.

Для расчетов запасов углерода на полях в Кинельском районе (рис. 3 а) использовалась матрица SRTM с шагом решетки 90, которая дает более подробный ландшафтный рисунок.

Протяженность участка 2100 м с юга на север и 2900 м с запада на восток. Абсолютные высоты слабо меняются – на 7,5 м (от 39,5 до 47,0 м). Общий наклон поля определяется на запад и северо-запад. Крутизна склонов более всего возрастает в северном направлении, а падает – в юго-восточном направлении. Анализируемая выборка содержит 29 точек измерения.

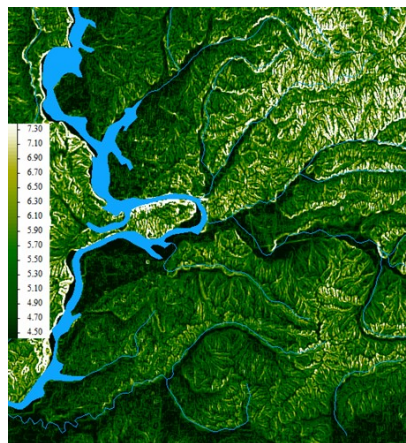
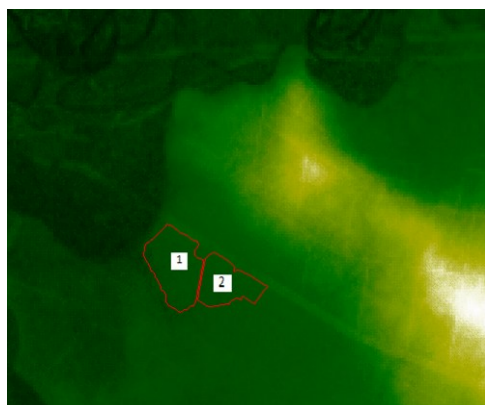
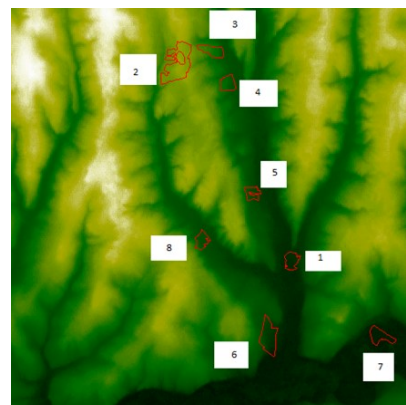


Рис. 2. Самарская область. Предсказательная карта содержания $C_{орг}$, %, рассчитанная по модели (2), шаг решетки 600 м



а



б

Рис. 3. Матрица высот с границами полей: а) в Кинельском районе; б) в Похвистневском районе

Содержание углерода в % ПОУр на поле описывается следующим уравнением:

$ПОУр = 0,4397 \cdot 1/GA + 0,3111 \cdot \sin(A0)/GA - 10 \cdot 4,361 \cdot Y + 0,9704 \cdot F(35;240) + 4876$

$R^2 = 0,485$; $P < 10^{-2}$, (3)

где $1/GA$ есть выполаживание склонов (пологость склонов);

$\sin(A0)/GA$ есть выполаживание восточных склонов (пологость восточных склонов);

Y – расстояние на изучаемом участке по направлению на север;

$F(35;240)$ – освещенность склонов с юго-запада.

Уравнение (3) показывает, что рост содержания органического углерода происходит с увеличением

пологости склонов (или со снижением крутизны) всех склонов и восточных, в частности: рост на единицу фактора повышает содержание углерода на 0,11 %; в тенденции каждые 450 м при продвижении по участку на север снижают ПОУр на 1 %; освещенность знаку его нельзя доверять.

По результатам уравнения (3) показано, что 48,5 % дисперсии ПОУр объясняется дисперсией перечисленных факторов: из них на 30,2 % – расстоянием на север и 20,6 % – освещенностью склонов с юго-запада.

Плотность почв D (г/см³) на изучаемом участке описывается нижеследующим уравнением

$$D = -0,4041 \cdot KR + 0,01512 \cdot (Z-Zav)^2 + 0,3097 \cdot M - 0,1371 \cdot GA + 1,287$$

$$R^2 = 0,486; P < 10^{-2}, \quad (4)$$

где KR есть кольцевая кривизна, характеризующая близость к кольцевым формам и кривизну линий тока;

$(Z-Zav)^2$ есть нелинейная связь с высотой (плотность почвы возрастает на больших высотах и на малых, снижается – на средних);

M – несферичность (с ростом значений предиктора формы стремятся к вытянутым, это могут быть выпуклые и вогнутые отроги);

GA – крутизна склонов.

Уравнение (4) показывает, что рост плотности почвы происходит со снижением кривизны линий тока (легкие частицы уносятся с возрастанием кривизны линий тока, тяжелые скорее остаются в местах с более низкими значениями кривизны), в частности: снижение кольцевой кривизны линий тока на 1 единицу измерения повышает плотность на 0,02 г/см³. Нелинейная связь с высотой $(Z-Zav)^2$ со знаком «+» означает снижение плотности в интервале от 39 м до 43 (на 0,1 г/см³ на каждый м высоты) и увеличение плотности в интервале высот от 43 м до 47 м (на 0,06 г/см³ на каждый м высоты), что может быть связано с затруднением выноса тяжелых частиц наверху и накоплением легких и тяжелых внизу, а снижение посередине (на склонах) – с активным выносом. Последнее обстоятельство подтверждается также отрицательной связью с четвертым предиктором – крутизной склонов (чем больше крутизна, тем активнее перенос частиц).

По результатам уравнения (4) показано, что 48,6 % дисперсии D объясняется дисперсией перечисленных выше факторов: из них на 28,8 % объясняет кольцевая кривизна, на 27,5 % – нелинейная связь с высотой, на 24,9 % – несферичность и 18,8 % крутизна склонов.

Запасы почвенного углерода ПОУв (т/га, $0,1 \cdot SOCp \cdot D \cdot 20$), на изучаемом участке изменяются в соответствии со следующим уравнением:

$$ПОУв = 0,004491 \cdot 1/GA + 0,00330 \cdot \sin(A_0)/GA - 0,01001 \cdot \sin(A45) + 0,02181 \cdot M + 0,01331 \cdot R^2 = 0,512; P < 10^{-2}, \quad (5)$$

где предикторы $1/GA$ и $\sin(A_0)/GA$ и их свойства описаны в ур. (3);

$\sin(A45)$ есть склоны северо-восточной экспозиции, а со знаком «–» они являются юго-западными;

M есть несферичность (описана в уравнении (4)).

Уравнение (5) показывает, что рост запасов углерода происходит с увеличением пологости всех склонов и восточных, в частности: рост фактора на единицу повышает содержание углерода на 0,0014 г/см³; в тенденции прирост несферичности на единицу фактора увеличивает ПОУв на 0,0026 г/см³, а увеличение $\sin(A45)$ на единицу измерения приводит к снижению запасов на 0,0026 г/см³.

Уравнение (5) показывает, что 51,2 % дисперсии ПОУв объясняется дисперсией предикторов уравнения (4): из них на 32,3 % – пологостью всех склонов, на 24,8 % – дополнительно пологостью восточных склонов, на 24,5 % – северо-восточными склонами и на 18,3,6 % – несферичностью.

Уравнение (5) было визуализировано в виде матрицы 2889 м (по X) · 2080 м (по Y), и на ней был выделен – векторный слой с границами полей. По матрице внутри границ полей было рассчитано среднее значение ПОУв.

Запасы углерода на поле (табл. 3) вычисляем как среднее значение ПОУв по матрице, ограниченной векторным слоем поля, умноженной на площадь поля.

Таблица 3. Запасы углерода с учетом площади поля, т

№ поля	Среднее значение ПОУв, т/га	Площадь поля, га	Общие запасы С, т
1	9,5	321,5700	3054,915
2	4,25	2187,0000	9294,75

Протяженность участка в Похвистневском районе 16,7 км с юга на север и 10,7 км с запада на восток. Абсолютные высоты меняются заметно – на 142 м (от 58 до 200 м), они снижаются с запада на восток и растут с юга на север. Крутизна склонов более всего возрастает в северном направлении, а падает – в восточном направлении (рис. 3 б). Анализируемая выборка содержит 24 точки измерения.

Содержание углерода в % ПОУр на участке описывается уравнением, представленном ниже

$$ПОУр = 2,174 \cdot khe - 1,243 \cdot \cos(A_0) + 0,8311 \cdot KA - 0,2337 \cdot rot + 5,001$$

$$R^2 = 0,658; P < 10^{-3}, \quad (6)$$

где khe есть избыточная горизонтальная кривизна, которая характеризует расчлененность рельефа в плане и в контексте процессов интенсифицирует отложение частиц в этих зонах;

$\cos(A_0)$ есть северность склонов (со знаком «–» – южность склонов);

KA – аккумуляционная кривизна, описывающая зоны аккумуляции почвенных частиц;

rot – ротор характеризует кривизну линий тока с учетом их направления (знак «+» означает направление по часовой стрелке).

Рост содержания органического углерода происходит с увеличением избыточной горизонтальной

кривизны, в частности: увеличение фактора на единицу повышает содержание углерода на 1,1 %; рост происходит с увеличением аккумуляционной кривизны (рост фактора на единицу увеличивает содержание углерода на 0,5 %); снижение ПОУр происходит при уменьшении значений южного расположения склонов и уменьшении кривизны линий тока по часовой стрелке.

По результатам уравнения (2) показано, что 65,8 % дисперсии ПОУр объясняется дисперсией перечисленных факторов: из них на 28,0 % – khe , на 27,9 % – $\cos(A_0)$, на 24,8 % – KA и на 19,3 % – rot .

Плотность почв D (г/см³) на изучаемом участке описывается нижеследующим уравнением

$$D = -0,06785 \cdot E - 0,1150 \cdot kv \cdot I1 + 0,06458 \cdot KA + 0,02953 \cdot \sin(A_{45})/GA + 1,208$$

$$R^2 = 0,655; P < 10^{-3}, \quad (7)$$

где E есть разностная кривизна, характеризующая преобладание одного из механизмов аккумуляции (со знаком «+» преобладает профильный механизм, со знаком «–» – горизонтальный);

$kv \cdot I1$ есть вертикальная кривизна, характеризующая профильный механизм аккумуляции с индикатором $I1$ ($I1$ – индикатор принимает значения единицы при $\cos(A_0) < 0$ или на склонах южной экспозиции и значение ноль – на склонах северной экспозиции), KA есть аккумуляционная кривизна (описана в уравнении (2));

$\sin(A_{45})/GA$ есть северо-восточность пологих склонов.

Уравнение (7) показывает, что плотность почвы повышается при росте $-E$, $-kv \cdot I1$, KA и $\sin(A_{45})/GA$.

По результатам уравнения (7) показано, что 65,5 % дисперсии D объясняется дисперсией перечисленных выше факторов: из них на 34,4 % объясняет разностная кривизна E , на 26,1 % – $kv \cdot I1$, на 23,0 % – KA и на 16,5 % пологие северо-восточные склоны $\sin(A_{45})/GA$.

Запасы почвенного углерода ПОУв (т/га, $0,1 \cdot SOCp \cdot D \cdot 20$), на изучаемом участке изменяются в соответствии со следующим уравнением

$$ПОУв = 1,453 \cdot KA - 1,842 \cdot kmin \cdot I1 - 0,2968 \cdot rot - 0,1538 \cdot TI + 10,21$$

$$R^2 = 0,709; P < 10^{-4}, \quad (8)$$

где предиктор KA и rot и их свойства описаны в уравнении (6);

$kmin \cdot I1$ минимальная кривизна описывает килевые формы на южных склонах и TI – топографический индекс влажности.

Уравнение (8) показывает, что рост запасов углерода происходит с ростом аккумуляционной кривизны, в килевых формах на южных склонах, при снижении кривизны линий тока, направленных против часовой стрелки и при уменьшении топографического индекса влажности. Так, например, при росте аккумуляционной кривизны и изменении в килевых формах на южных склонах на одну единицу измерения запасы углерода увеличиваются на 1,0 г/см³.

Уравнение (8) показывает, что 70,9 % дисперсии ПОУв объясняется дисперсией предикторов уравнения (8): из них на 35,6 % – аккумуляционной кривизной, на 30,1 % – минимальной кривизной на южных склонах, на 17,9 % – кривизной линий тока с направлением против часовой стрелки и на 16,4 % – топографическим индексом влажности.

Уравнение (8) было визуализировано в виде матрицы 10700 м (по X) · 16700 м (по Y), и на ней был выделен векторный слой с границами полей. По матрице внутри границ полей было рассчитано среднее значение ПОУв.

Запасы углерода на поле вычисляем, умножая среднее значение ПОУв по матрице Похвистнево на площадь поля (табл. 4).

Таблица 4. Запасы углерода с учетом площади поля, т

№ поля	Среднее значение ПОУв, т/га	Площадь поля, га	Общие запасы C , т
1	18,0	55,8900	1006,02
2	16,0	206,5500	3304,8
3	16,0	65,6100	1049,76
4	16,5	60,7500	1002,375
5	17,0	45,3600	771,12
6	17,5	137,7000	2409,75
7	13,0	76,1400	989,82
8	16,0	53,4600	855,36

Среднее значение ПОУ в Кинельском районе составило 4,25...9,5 т/га, а в Похвистневском – 13,0...18,0 т/га. При этом, учитывая площадь полей, общие запасы углерода составили 3 054,915...9 294,75 т и 771,12...3 304,8 т. В среднем количество органического углерода в Похвистневском районе превышает данный показатель в Кинельском в 2...3 раза, что может быть связано с особенностями технологии возделывания почвы (ресурсосберегающее земледелие, No-till), рельефом местности.

В отличие от участка Кинель, запасы углерода рядом с п. Похвистнево определяются не пологостью склонов, а кривизной, характеризующей процесс аккумуляции частиц (KA) и килевыми формами ($kmin$). По-видимому эти различия связаны с выраженностью рельефа на участке Похвистнево (перепад высот 142 м)

Обсуждение

Полученные результаты согласуются с выводами других авторов относительно оценки суммарных запасов почвенного органического углерода за счет получения матрицы высот из данных SRTM30, расчета матриц MB , определения статистических связей с помощью корреляции и подхода множественной регрессии. Отличительная особенность рекомендованной нами методики – создание матрицы предсказанных характеристик агроэкосистемы, позволяющих моделировать их динамику в долгосрочной перспективе [17–20].

В научной литературе представлены ретроспективные данные и долгосрочные сценарии динамики

запасов углерода в пахотных дерново-подзолистых почвах [21, 22]. В нашем исследовании на основании проанализированных ретроспективных данных и собственных исследований дана оценка состоянию плодородия и суммарному запасу почвенного органического углерода на черноземных почвах центральной агроклиматической зоны Самарской области. Полученные данные визуализированы с помощью компьютерной программы «Аналитическая ГИС Эко», построена карта-матрица, позволяющая составлять характеристику урожая на исследуемых черноземах.

Установлено, что на запасы углерода влияет не крутизна склонов, а их кривизна, определяющая интенсивность аккумуляции частиц. Ключевую роль играют килевые формы рельефа, отражающие общую расчлененность поверхности.

Согласно полученным нами результатам можно утверждать, что благодаря проведенным исследованиям с использованием точной GPS-привязки почвенные разрезы становятся очень ценным объектом для наблюдения за скоростью накопления органического углерода, объемом поглощения парниковых газов и увеличения запасов органического углерода.

Заключение

Запасы углерода в почве площадки полигона в Кинельском районе в значительной степени определяются пологостью (выполаживанием) склонов как всех, так и, дополнительно, восточных склонов, на которых запасы возрастают. Сравнение выраженных пологих склонов с менее пологими в выборке (33 % точек) дает разницу ПОУ_W в 26,2 %.

Несмотря на заметно малые значения самой крутизны на поле (среднее значение 0,44° при шаге решетки 90 м, от 0,09° до 1,68°), рассчитываемая из крутизны пологость склонов является наиболее статистически значимым фактором. Отказ учитывать количественно малые (пренебрежительно малые) величины, характеризующие условия среды, противоречит полученным результатам.

Запасы углерода в почве площадки полигона Похвистневского района в значительной степени определяются аккумуляционной кривизной и килевыми формами на южных склонах. Сравнение склонов с отрицательными и положительными КА и килевых форм на южных склонах (100 % точек) дает разницу ПОУ_W в 10,8 % и 8,5 % соответственно.

Литература

1. Кудяров В. Н. Секвестрация углерода в почве: факты и проблемы (аналитический обзор) // Успехи современной биологии. 2022. Том 142. № 6. С. 545-559.

2. Концентрация углекислого газа в атмосфере: справочные данные / News of the age of sustainable development – 2022. – URL: <https://theworldonly.org/CO2-concentration-last-week/>. (дата обращения: 21.03.2026).

3. Федеральный Закон «Об ограничении выбросов парниковых газов» <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (дата обращения: 18.02.2026).

4. Иващенко К. В., Сушко С. В., Дворников Ю. А. Запасы почвенного органического углерода при нулевой обработке почвы в условиях среднего Поволжья // Агрохимия. 2023. № 12. С. 47-56.

5. Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р (ред. от 20.01.2021) «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов» // URL <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-minprirody-rossii-ot-30062017-n-20-r-ob-utverzhdanii/> (дата обращения: 21.03.2026).

6. Герасимова Е. Б. Применение инструментов MS Excel для построения и анализа моделей множественной регрессии в эконометрических исследованиях // Экономика и управление: проблемы, решения. 2021. № 5. С. 112-118.

7. Мхитарян В. С., Шишов В. Ф. Оценка качества и адекватности эконометрических моделей на основе анализа остатков // Вестник университета. 2022. № 6. С. 145-152.

8. Ивашнев Л.И. Методы регрессии в экономической математике: Монография. М.: Изд-во МГОУ, 2005. 200 с.

9. Попова Л. В. Анализ и прогнозирование экономических процессов с использованием регрессионных моделей // Вестник экономики и права. 2023. № 1. С. 44–51.

10. Ивашнев Л. И. Методы линейной множественной регрессии в матричной системе. Известия МГТУ «МАМИ» № 4(26). 2015. т. 4. С. 35-41.

11. Троц Н. М., Чернякова Г. И., Бокова А. А. Агроэкологический мониторинг почв лесостепного Поволжья при применении технологий почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. №2 (70). С. 49-56. doi: 10.18286/1816-4501-2025-2-49-56

12. Троц Н. М., Машков С. В., Бокова А. А. Ретроспективный анализ состояния плодородия черноземных почв в центральной агроэкологической зоне Самарской области // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 4. С. 21–28. doi: 10.55170/19973225_2023_8_4_21

13. Оценка составляющих баланса углерода в агроэкосистемах с традиционной и нулевой обработками черноземов / К. В. Иващенко, С. В. Сушко, А. В. Доброхотов и др. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. Т. 10. № 4. С. 3-10. doi: 10.55170/1997-3225-2025-10-4-3-10

14. Коломыц Э. Г., Шарая Л. С. Ландшафтно-экологические прогнозные модели углеродного баланса в лесных экосистемах при глобальном потеплении // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. №1-7. С. 1481-1487.

15. Заварзин Г. А. Кудеяров В. Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестник РАН. 2006. № 1. С. 14-29.

16. Суховеева О. Э. Золотухин А. Н., Карелин Д. В. Климатообусловленные изменения запасов органического углерода в пахотных черноземах курской области // Аридные экосистемы. 2020. Т 26, № 2 (83), С. 72-79.

17. Сушко С. В., Балашов Е. В., Бучкина Н. П. Оценка эффективности ресурсосберегающих технологий в повышении секвестрации органического углерода сельскохозяйственными почвами в условиях Среднего Поволжья (на примере нулевой обработки почвы) // Современные проблемы почвозащитного земледелия: материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 40-летию опыта по контурно-мелиоративному земледелию ВНИИЗиЗПЭ. Курск, 2022. С. 130-134.

18. Прогноз влияния изменений климата на состояние агроценозов и продуктивность сельского хозяйства России / В. А. Романенков, И. А. Романенко, Д. И. Рухович и др. под ред. В. Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2009. 95 с. ISBN 978-5-9238-0105-7.

19. Захаренко В. А. Мониторинг фитосанитарного состояния агроэкосистем в связи с прогнозированием площадей обработок пестицидами в Российской Федерации // Агрохимия. 2018. № 12. С. 3-21. doi:10.1134/S0002188118120128

20. Рухович О. В., Беличенко М. В. и др. Аккумуляция атмосферного углерода культурами севооборота и влияние систем удобрения на накопление органического углерода пахотной дерново-подзолистой почвой // Агрохимия. 2020. № 12. С. 3-14.

21. Рухович О. В., Белолюбцев А. И., Прокашев А. М. Динамика запасов органического углерода почвы в пахотном слое и продуктивность культур почвозащитного агролесоландшафтного комплекса // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 8. С.14

22. Романенков В. А., Романенко И. А., Рухович Д. И., Королева П. В., Сиротенко О. Д., Шевцова Л. К., Рухович О. В. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России / под ред. В. Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2009. 95 с. ISBN 978-5-9238-0105-7

References

1. Kudeyarov, V.N., Carbon sequestration in soil: facts and problems (analytical review) //Advances in modern biology, 2022, Vol. 142, No. 6, P. 545-559.

2. Carbon dioxide concentration in the atmosphere: reference data / News of the age of sustainable development – 2022. – URL: <https://theworldonly.org/CO2-concentration-last-week/>. (access date: 21.03.2026).

3. Federal Law "On Limiting Greenhouse Gas Emissions" <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (access date: 18.02.2026).

4. Ivashchenko K. V., Sushko S. V., Dvornikov Yu. A. Soil organic carbon reserves under no-tillage in the Middle Volga region // Agrochemistry. 2023. No. 12. P. 47-56.

5. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated June 30, 2017 No. 20-r (as amended on January 20, 2021) "On Approval of Methodological Guidelines for Quantifying Greenhouse Gas Absorption" // URL <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-minprirody-rossii-ot-30062017-n-20-r-ob-utverzhenii/> (access date: 21.03.2026).

6. Gerasimova E. B. Application of MS Excel Tools for Constructing and Analyzing Multiple Regression Models in Econometric Research // Economics and Management: Problems, solutions. 2021. No. 5. P. 112-118.

7. Mkhitarian V. S., Shishov V. F. Evaluation of the quality and adequacy of econometric models based on the analysis of residuals // Vestnik of the University. 2022. No. 6. P. 145-152.

8. Ivashnev L. I. Regression methods in economic mathematics: Monograph. Moscow: Publishing house of Moscow State University, 2005. 200 p.

9. Popova L. V. Analysis and forecasting of economic processes using regression models // Vestnik of Economics and Law. 2023. No. 1. P. 44–51.

10. Ivashnev L. I. Methods of linear multiple regression in a matrix system. Vestnik of Moscow State Technical University "MAMI" No. 4(26). 2015. Vol. 4. P. 35–41.

11. Trots N. M., Chernyakova G. I., Bokova A. A. Agroecological monitoring of soils of the forest-steppe Trans-Volga region when applying soil-conserving and resource-saving agriculture technologies // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2025. No. 2 (70). P. 49-56. doi: 10.18286/1816-4501-2025-2-49-56

12. Trots N. M., Mashkov S. V., Bokova A. A. Retrospective analysis of the fertility state of black soils in the central agroecological zone of Samara region // Vestnik of Samara State Agricultural Academy. 2023. No. 4. P. 21–28. doi: 10.55170/19973225_2023_8_4_21

13. Assessment of carbon balance components in agroecosystems with traditional and no-tillage of black soils / K. V. Ivashchenko, S. V. Sushko, A. V. Dobrokhotoev et al. // Vestnik of Samara State Agricultural Academy. 2025. Vol. 10. No. 4. P. 3-10. doi: 10.55170/1997-3225-2025-10-4-3-10

14. Kolomyts E. G., Sharaya L. S. Landscape-ecological forecast models of carbon balance in forest ecosystems under global warming // Vestnik of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2009. No. 1-7. P. 1481-1487.

15. Zavarzin G. A. Kudeyarov V. N. Soil as the main source of carbon dioxide and a reservoir of organic carbon in Russia // Vestnik of the Russian Academy of Sciences. 2006. No. 1. P. 14-29.

16. Sukhoveeva O. E., Zolotukhin A. N., Karelin D. V. Climate-induced changes in organic carbon stocks in arable black soils of the Kursk region // Arid ecosystems. 2020. Vol. 26, No. 2 (83), P. 72-79.

17. Sushko S. V., Balashov E. V., Buchkina N. P. Evaluation of the effectiveness of resource-saving technologies in increasing organic carbon sequestration by agricultural soils in the Middle Volga region (using no-tillage as an example) // Modern problems of soil conservation agriculture: Proceedings of the VI International scientific and practical conference dedicated to the 40th anniversary of the experience in contour-reclamation agriculture of the All-Russian Research Institute of Soil Protection and Land Reclamation. Kursk, 2022. P. 130-134.

18. Forecast of the impact of climate change on the state of agrocenoses and agricultural productivity in Russia / V. A. Romanenkov, I. A. Romanenko, D. I. Rukhovich, et al., edited by V. G. Sychev. Moscow: All-Russian Research Institute of Automation, 2009. 95 p. ISBN 978-5-9238-0105-7.

19. Zakharchenko V. A. Monitoring of the phytosanitary state of agroecosystems in connection with forecasting the areas of pesticide treatment in the Russian Federation // Agrochemistry. 2018. No. 12. P. 3-21. doi:10.1134/S0002188118120128

20. Rukhovich O. V., Belichenko M. V., et al. Accumulation of atmospheric carbon by crop rotation crops and the effect of fertilization systems on the accumulation of organic carbon in arable sod-podzolic soil // Agrochemistry. 2020. No. 12. P. 3-14.

21. Rukhovich O. V., Belolyubtsev A. I., Prokashev A. M. Dynamics of soil organic carbon reserves in the arable layer and the productivity of crops of the soil-protective agroforest landscape complex // Vestnik of Kursk State Agricultural Academy. 2021. No. 8. P. 14

22. Romanenkov V. A., Romanenko I. A., Rukhovich D. I., Koroleva P. V., Sirotenko O. D., Shevtsova L. K., Rukhovich O. V. Forecast of the dynamics of organic carbon stocks in arable lands of European Russia / edited by V. G. Sychev. Moscow: All-Russian Research Institute of Automation, 2009. 95 p. ISBN 978-5-9238-0105-7