

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ЗАЛЕЖНЫХ ПОЧВАХ

*К.Г. Гиниятуллин¹, С.С. Рязанов², Е.В. Смирнова¹,
Л.И. Латыпова¹, Л.Ю. Рыжих¹*

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

²*Институт проблем экологии и недропользования Академии наук
Республики Татарстан, г. Казань, 420087, Россия*

Аннотация

В отобранных послойно (через 5 см) образцах из старопахотного горизонта залежных светло-серых лесных почв определяли содержание органического вещества (ОВ) и плотность сложения для расчета запасов гумуса. Образцы отбирались из 50 точек пробоотбора, распределенных на участке исследования по стратифицированной рандомизованной схеме. Расчет запасов гумуса проводили с использованием геостатистических методов интерполяции с учетом пространственной горизонтальной и вертикальной изменчивости содержания ОВ в старопахотном горизонте, его плотности сложения и мощности. Установлено, что накопление почвенного органического вещества под залежами происходит преимущественно в верхней части старопахотного горизонта, а количество накопленного за 15 лет нахождения под залежной растительностью гумуса составляет 21% от его общего запаса. В работе описаны также методические аспекты отбора почвенных проб, позволяющие получить несмещенную оценку запасов гумуса.

Ключевые слова: залежные почвы, запасы органического вещества, геостатистика

Введение

В отличие от почв естественных ценозов, имеющих отрицательный баланс поступающего в почву углерода и углерода выделяющегося за счет дыхания гетеротрофов, пахотные почвы в большинстве случаев характеризуются равновесным балансом [1]. Вследствие этого накопление органического вещества (ОВ) в них может происходить только при применении специальных приемов агротехники или внесении высоких доз органических удобрений. Выведение почв из пашни за счет перевода в кормовые угодья или в залежное состояние рассматривается как один из эффективных приемов секвестрации углерода атмосферы для предотвращения глобального изменения климата. Бывшие пахотные почвы уже после 5 лет залежного развития характеризуются отрицательным балансом углекислого газа, который оценивается по разности интенсивности дыхания микроорганизмов, разлагающих ОВ и подстилку, и чистой первичной продуктивностью, следовательно, они являются устойчивым стоком углерода атмосферы [2]. Сток углекислого газа атмосферы при изменении землепользования

с пашни на естественные ценозы или кормовые угодья может осуществляться в форме как увеличения запасов почвенного органического вещества (ПОВ), так и накопления ОВ в надземной и подземной фитомассе [3–5]. Если общее накопление углерода в залежных почвах принимается большинством авторов, то отношение к изменению запасов собственно ПОВ не столь однозначно. В работе [5] на основании мета-анализа литературных источников было показано, что при естественном зарастании пашни лесом запас ПОВ увеличивается на 53%, при переводе в пастбища – на 19%. Увеличение запасов ОВ отмечалось в залежных серых лесных почвах [7, 8], в дерново-подзолистых [9], а также в черноземах под луговой растительностью, при небольшом падении на ранних стадиях сукцессий [6]. В работе [10] также отмечается накопление органического углерода для ряда зональных почв России от дерново-подзолистых до каштановых, при этом скорость накопления была максимальна в первые 15 лет. В отдельных работах отмечается [11, 12], что при зарастании пашни лесом происходит не только увеличение содержания гумуса, но и изменение его качественного состава.

Существуют исследования, в которых отмечается ухудшение гумусного состояния окультуренных пахотных почв под залежами [13]. Уменьшение запасов гумуса в слое 0–50 см в залежных почвах южной тайги в течение первых 55 лет было отмечено в работе [14]. Рядом исследователей указывается на отсутствие статистически значимого изменения запасов ПОВ под залежами. Так в [15] не было выявлено значимого изменения запасов гумуса в слое 0–50 см даже при наблюдаемой дифференциации старопахотного горизонта по его содержанию.

Известно мнение, что изменение гумусного состояния почв под залежами протекает разнонаправлено и зависит от ряда факторов: биоклиматических условий, типа и свойств почвы, истории предыдущего использования пахотных угодий, гранулометрического состава [16] и, вероятно, также от стадии развития залежной растительности. По расчетам А.А. Романовской [17], сделанным на основании математического моделирования, в северных и центральных регионах Европейской части РФ и области Дальнего Востока под залежами происходит аккумуляция почвенного углерода, в южных районах наоборот – его интенсивная потеря. В работе [18] наблюдали при сравнении с пахотными почвами существенное снижение содержания ОВ на стадии зарастания пашни сорняками (при возрасте залежи 2 и 7 лет), затем отмечалось постепенное увеличение содержания ПОВ в слое 0–10 см при зарастании лесом. По мнению авторов [19], заметное увеличение запасов гумуса происходит в течение первых 5–7 лет после прекращения распашки в таежной зоне до возраста залежи 40 лет с последующим уменьшением в почве 90–100-летнего леса.

Существующая неоднозначность мнений о направленности изменения гумусного состояния постагрогенных почв наряду с объективными причинами может быть связана с разнообразием используемых методических подходов к оценке запасов гумуса. На результаты могут влиять вертикальная и горизонтальная изменчивость содержания гумуса, плотности сложения старопахотного горизонта, мощности пахотного слоя. Их пространственная вариабельность, как правило, не учитывается при традиционных исследованиях, основанных на изучении так называемых «парных» объектов по профильным единичным

или смешанным образцам. Существенное влияние на результаты оценок может оказывать и глубина слоя, на которую они рассчитываются. Вертикальная дифференциация старопахотного горизонта по содержанию гумуса формируется за счет его преимущественного накопления в верхних слоях (0–10 см, реже 10–20 см) [7, 8, 10, 18, 19], что также может сказаться на результатах оценки запасов ПОВ.

Влияние пространственной неоднородности может быть весьма существенным, поскольку даже в естественных лесных почвах коэффициент вариации содержания гумуса в верхнем слое (0–10 см) горизонта А1 может достигать 50% [20]. Ранее нами было показано, что содержания ОВ в старопахотных горизонтах залежных светло-серых лесных почв также характеризуется сильной вариабельностью [21], причем имеет существенную положительную корреляцию с корневой биомассой [22]. Получается, что микропестрота залежной растительности будет сложным образом сочетаться с микропестротой исходной старопахотной почвы, что создает предпосылки для формирования сильного пространственного варьирования свойств залежных почв.

Цель настоящей работы – оценить запасы гумуса в старопахотном горизонте светло-серой лесной залежной почвы с учетом горизонтальной и вертикальной пространственных неоднородностей на основе применения геостатистических методов.

1. Объекты и методы

Для проведения исследований был выбран участок светло-серой лесной почвы площадью 10.2 га под 15-летней залежной растительностью, которая представлена луговым разнотравьем, зарастающим древесными культурами – березой и сосной. При планировании отбора образцов исходили из необходимости получения адекватной модели регионализации при применении геостатистических методов интерполяции. При определении количества образцов исходили из того, что при вычислении параметров базовых геостатистических моделей методом ограниченного максимального правдоподобия минимально допустимым считается использование 50 пространственно локализованных точек [23]. При этом приходилось учитывать, что точность картирования и пространственной оценки параметров окружающей среды при минимальном наборе точек существенно зависит от равномерности их распределения, простейший способ – это провести отбор образцов на основе систематической решетки. Однако эта схема не оптимальна, если область исследования имеет неправильную форму, когда некоторые участки могут остаться необследованными. Подобный пробоотбор может оказать влияние на результат применения геостатистических методов интерполяции, поскольку точность описания пространственной автокорреляции зависит от наличия пар проб с малым расстоянием между ними, когда может возникать искусственный наггет-эффект.

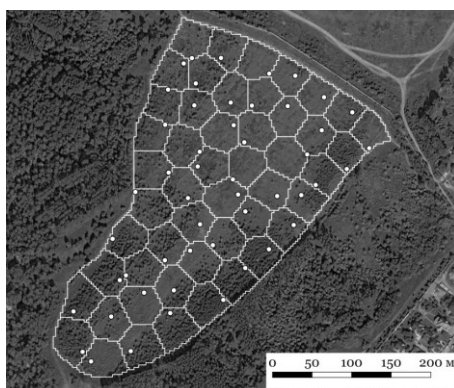


Рис. 1. Схема отбора проб

Альтернативой в данном случае является стратифицированный рандомизированный пробоотбор, при котором географически компактные элементарные участки рассматриваются как страты, в пределах которых место отбора закладывается случайным образом, что позволяет получить пары точек с малыми расстояниями между ними. Увеличение рандомизованности выборки может быть получено, если страты будут иметь форму случайно формируемых многоугольников примерно одинаковой площади [24]. Схема пробоотбора (рис. 1) была получена с использованием пакета *srcosa* для статистической среды R. Точки отбора образцов определялись на местности с помощью полевого GPS-контроллера TRIMBLE JUNO 5D с точностью геопозиционирования до 1 м. Из верхних 0–15 см старопахотного горизонта образцы отбирались послойно через 0–5, 5–10, 10–15 см, ниже 15 см – на всю оставшуюся мощность старопахотного горизонта, при этом его глубина фиксировалась как величина b . Всего было отобрано 200 послойных образцов из 50 точек, в них определяли содержание ОВ по методу Тюринга. В 14 из 50 точек также послойно через 5 см отбирались почвенные образцы для определения плотности сложения (70 шт.).

Вариограммный анализ и пространственная интерполяция были выполнены при помощи пакета *gstat* в соответствии с методическими рекомендациями [25–27]. Итоговое оформление карт было проведено при помощи геоинформационной системы QGIS [28].

2. Обсуждение результатов

Статистические показатели пространственного варьирования свойств старопахотного горизонта. В табл. 1 представлены результаты определения содержания гумуса, плотности сложения и глубины нижней границы Апах. В верхнем слое содержание гумуса почти в 2 раза выше, чем в нижнем, а плотность сложения – ниже. В то же время содержание гумуса характеризуется сильным и близким к сильному, глубина пахотного горизонта – средним, а плотность сложения – низким пространственным варьированием.

Подходы к моделированию. Для моделирования пространственных закономерностей накопления гумуса строились 3 набора интерполированных карт. Первый – карты пространственного варьирования содержания ПОВ (отдельно

Табл. 1

Статистические показатели пространственного варьирования свойств старопашотного горизонта залежных светло-серых лесных почв

Показатели	Содержание ПОВ, %				Плотность сложения, г/см ³				Нижняя граница Апах, см
	0–5	5–10	10–15	15–b	0–5	5–10	10–15	15–b	
Слой, см	0–5	5–10	10–15	15–b	0–5	5–10	10–15	15–b	b
Объем выборки	50	50	50	50	14	14	14	14	50
Среднее	2.03	1.27	1.04	0.98	1.33	1.48	1.50	1.53	26.7
Стандартное отклонение	0.34	0.25	0.22	0.20	0.1	0.04	0.05	0.03	3.7
Коэффициент вариации, %	16.7	19.3	21.5	20.7	7.8	3.0	3.0	2.1	14.0
Минимум	1.40	0.83	0.49	0.48	1.15	1.40	1.44	1.47	20
Нижний квартиль	1.87	1.12	0.91	0.86	1.30	1.46	1.45	1.51	24
Медиана	2.03	1.25	1.03	0.97	1.32	1.47	1.49	1.53	27
Верхний квартиль	2.22	1.35	1.11	1.04	1.37	1.50	1.56	1.58	29
Максимум	3.20	2.06	1.77	1.87	1.53	1.56	1.56	1.58	33

для слоя 0–5, 5–10, 10–15 и 15–b см), второй – карта варьирования нижней границы пахотного слоя (0–b см), третий – карты варьирования плотности сложения почвенного материала (отдельно для слоя 0–5, 5–10, 10–15 и 15–b см). Первый и второй наборы создавались по данным, полученным по 50 пространственно локализованным точкам, третий – по 14. Для получения карт использовали различные подходы к интерполяции, но все они создавались с одинаковым фиксированным количеством интерполируемых точек, для которых рассчитывалось значение показателя запаса гумуса. Достоинством данной методики является возможность использования пространственных данных, полученных из различного количества образцов, отобранных в различных точках исследуемого пространства, и возможность использования для оценки запасов гумуса карт, полученных при применении различных методов интерполяции.

Выбор размера ячейки интерполированной карты. Разрешение итоговых карт, определяемое размерами ячеек прогнозной сетки, значительно влияет на их общее информационное содержание [29]. При расчете разрешения итоговых карт нами использовался метод оценки плотности точек по Хенглу [30], когда путем деления размера выборки (n) на общую площадь изучаемой области (A) вычисляются самое грубое, самое высокое и рекомендуемое разрешения:

– самое грубое разрешение

$$\leq 0.1\sqrt{A/n}, \quad (1)$$

– самое высокое разрешение

$$\leq 0.05\sqrt{A/n}, \quad (2)$$

– рекомендуемое разрешение

$$\leq 0.0791\sqrt{A/n}. \quad (3)$$

Табл. 2

Параметры моделей вариограмм и результаты перекрестной проверки

Показатель	Параметры вариограмм					Результаты перекрестной проверки		
	Модель	SSEг	Ранг (м)	C_0	C_1	ME	RMSE	RVar
ПОВ (0–5 см)	Sph	1.5E-05	54.06	0.00	0.11	0.004	0.37	0.115
ПОВ (5–10 см)	Sph	6.08E-06	48.37	0.00	0.06	0.006	0.25	0.074
ПОВ (10–15 см)	Sph	6.42E-06	33.42	0.00	0.05	–0.002	0.23	0.021
ПОВ (15– b см)	Sph (Cressie)	2.16E-06	53.17	0.00	0.03	0.002	0.22	0.088
Глубина b	Sph	1.21E-01	45.49	0.00	16.3	–0.014	4.2	0.045

Примечание: SSEг – суммарная квадратичная ошибка подгонки вариограммы, Ранг (м) – радиус автокорреляции, C_0 – величина наггета, C_1 – величина порога.

Рассчитанный на основе уравнений (1)–(3) рекомендуемый размер ячейки карт составил от 2.2 до 4.4 м. В настоящей работе пространственная интерполяция проводилась на основе раstra с размером пикселя 2.5×2.5 м.

Оценка точности пространственной интерполяции. Оценка точности пространственного прогноза проводилась перекрестной проверкой: из исходного набора данных последовательно изымалось по одной точке o_i , для которой затем вычислялось значение p_i , используя остальной набор данных. По разнице $p_i - o_i$ вычислялись следующие показатели:

– усредненная ошибка

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i - o_i, \quad (4)$$

– среднеквадратичная ошибка

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

Соотношение дисперсии прогнозируемых значений к дисперсии наблюдаемых значений:

$$RVar = \frac{Var[p]}{Var[o]}, \quad (6)$$

Пространственная интерполяция содержания гумуса и глубины пахотного горизонта. Экспериментальные вариограммы содержания гумуса по слоям и подогнанные модели теоретических вариограмм представлены на рис. 2. Наличие пространственной анизотропии проверялось с помощью направленных вариограмм с горизонтальным углом допуска 20° . Содержание гумуса, а также глубина нижней границы пахотного горизонта описывались изотропными сферическими вариограммами без наггет-эффекта (табл. 2).

В выбранной схеме пробоотбор проводился на основе страт, поэтому для пространственной интерполяции был применен метод блочного кригинга, который

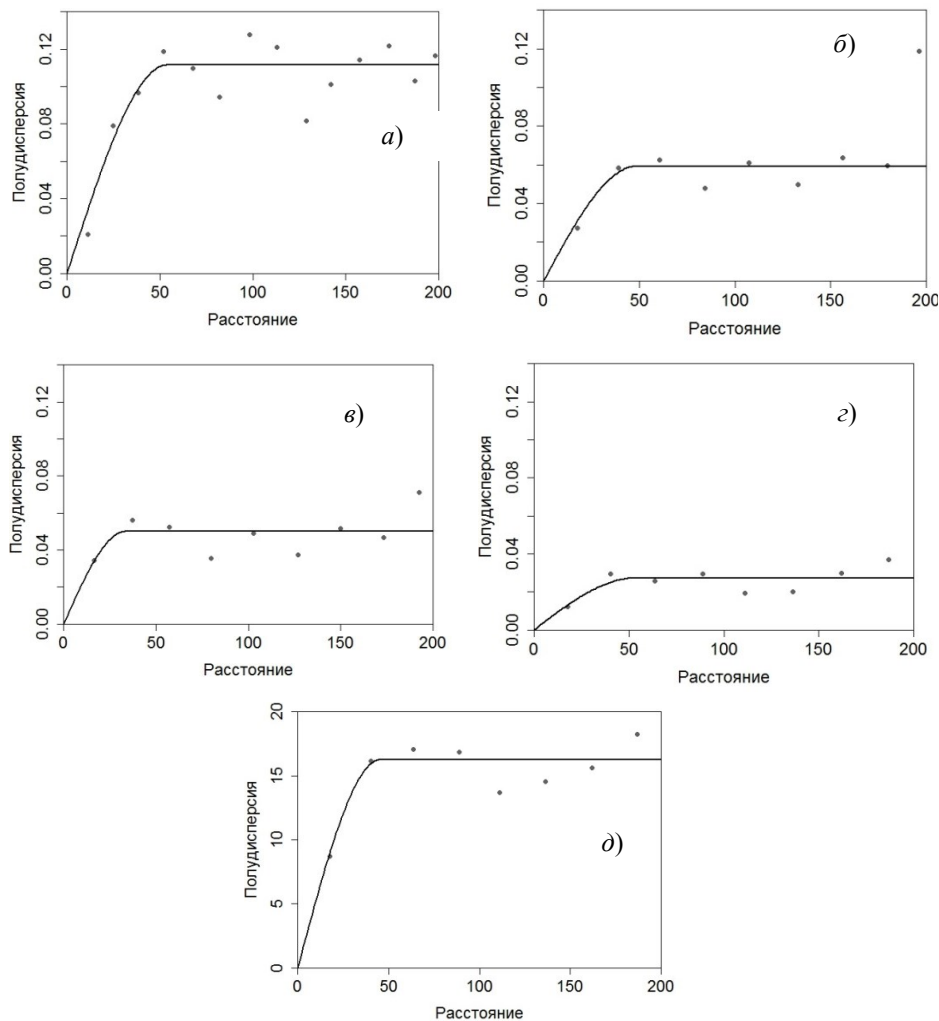


Рис. 2. Вариограммы содержания гумуса по слоям: а) 0–5 см; б) 5–10 см; в) 10–15 см; г) 15– b см и нижней границы пахотного горизонта (д)

является расширением ординарного кригинга и вычисляет среднее для большей области вместо точечного значения путем замены ковариации точка-точка ковариацией точка-блок [31]. Точечный кригинг, в отличие от блочного, может показывать высокие значения ошибки прогноза в случаях сильной вариабельности наблюдаемого показателя. При прогнозе средних значений для блоков, большая часть вариабельности (внутриблочной) усредняется и блочное среднее имеет меньшую ошибку прогноза, сохраняя пространственную структуру всего участка, если размеры блока не слишком большие [32]. Размер блока был подобран так, чтобы он совпадал со средним размером страт и составлял 50×50 м. Карты пространственного распределения показателей представлены на рис. 3.

Пространственная интерполяция плотности сложения. Малый объем выборки ($n = 14$) не позволяет использовать геостатистические методы для интерполяции показателя плотности сложения, поэтому был применен метод IDW (Inverse Distance Weighting). Главный фактор, влияющий на точность IDW –

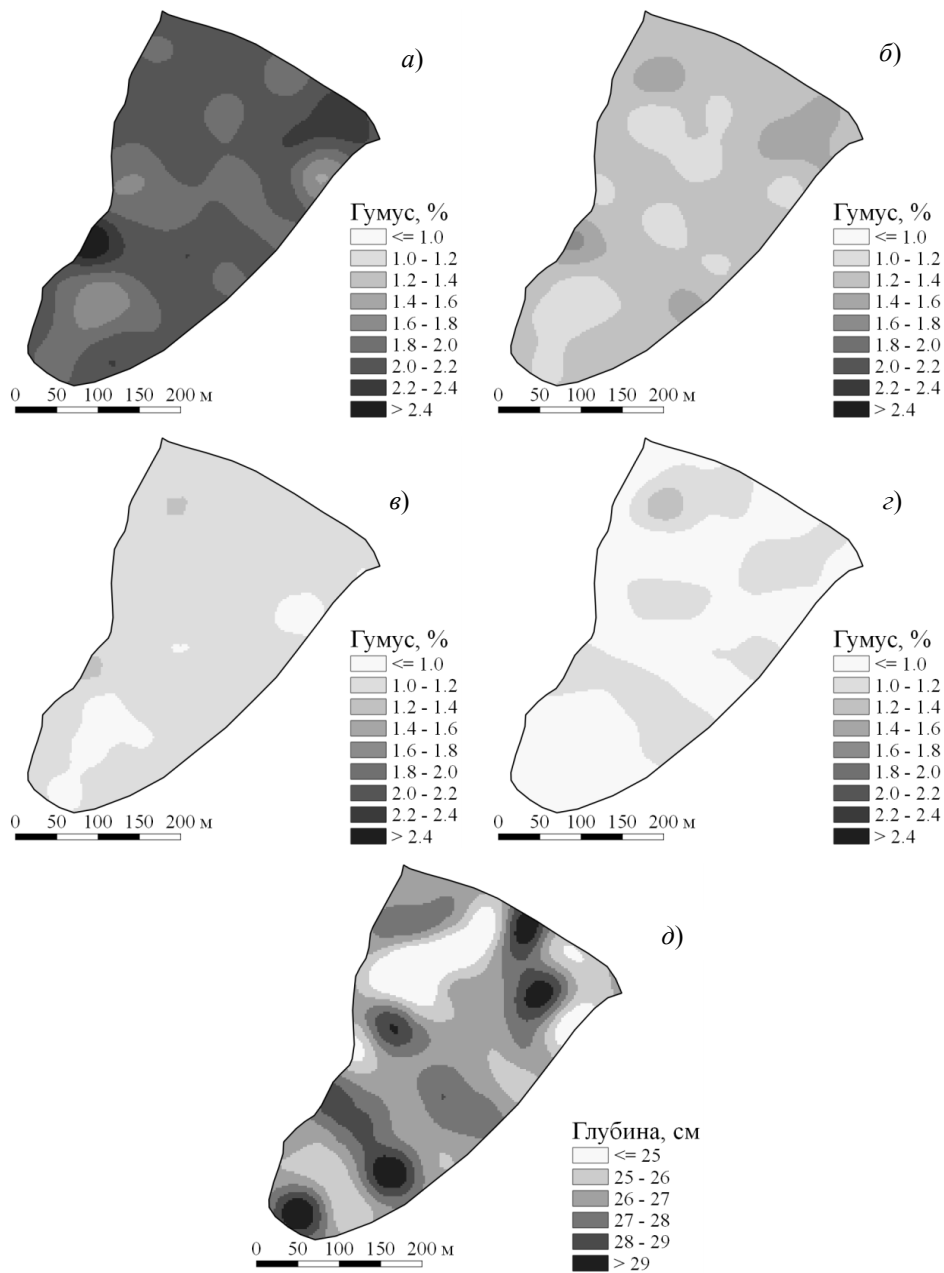


Рис. 3. Пространственное распределение гумуса по слоям: а) 0–5 см; б) 5–10 см; в) 10–15 см; г) 15–20 см и распределение глубины нижней границы пахотного горизонта (д)

параметр силы IDP [31]. Сглаженность итоговой карты возрастает с ростом параметра IDP. Результат интерполяции менее приемлем при IDP = 1 или 2, из-за эффекта «бычьего глаза» вокруг экспериментальных значений, поэтому интерполяция проводилась при IDP = 4, что является компромиссом между точностью интерполяции и сглаженностью итоговых карт. Результаты оценки точности представлены в табл. 3. Карты распределения плотности сложения представлены на рис. 4.

Табл. 3

Результаты перекрестной проверки карт пространственного распределения плотности сложения

Показатель	IDP	ME	RMSE	RVar
Плотность сложения (0–5 см)	4.0	0.003	0.058	0.386
Плотность сложения (5–10 см)	4.0	–0.027	0.163	0.392
Плотность сложения (10–15 см)	4.0	0.005	0.060	0.363
Плотность сложения (15–b см)	4.0	–0.008	0.050	0.220

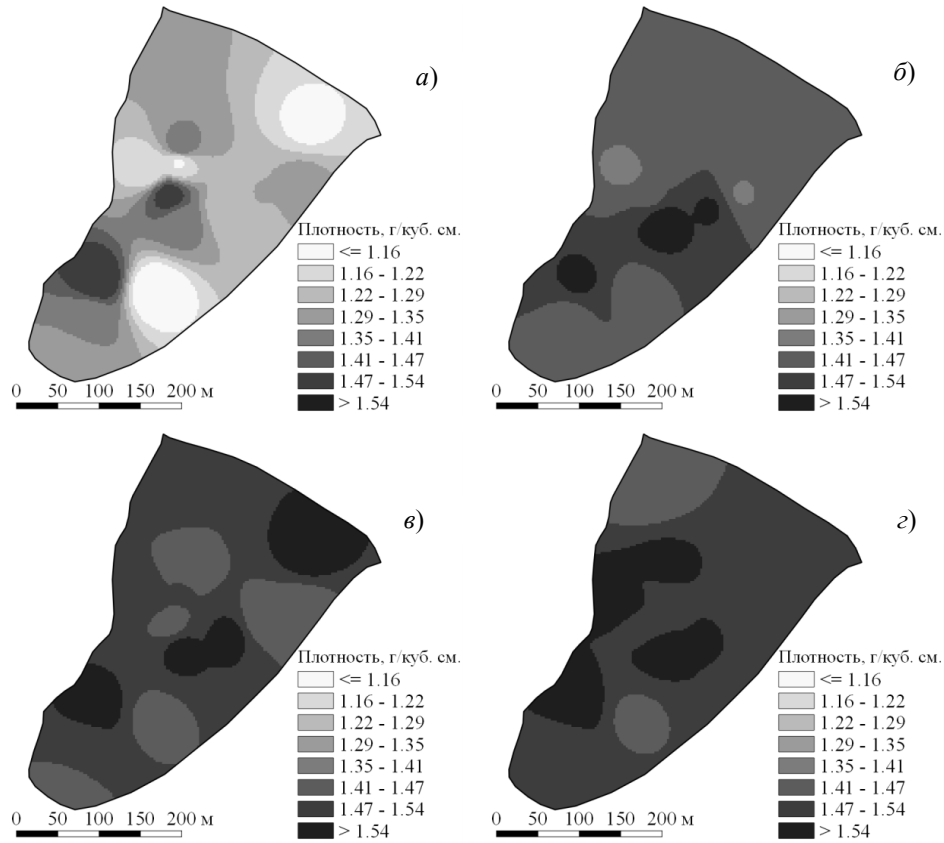


Рис. 4. Пространственное распределение плотности сложения: : а) 0–5 см; б) 5–10 см; в) 10–15 см; з) 15–b см

Оценка запасов гумуса. Оценка проводилась по слоям для каждой интерполированной точки согласно формуле

$$Q = mhd_v, \quad (7)$$

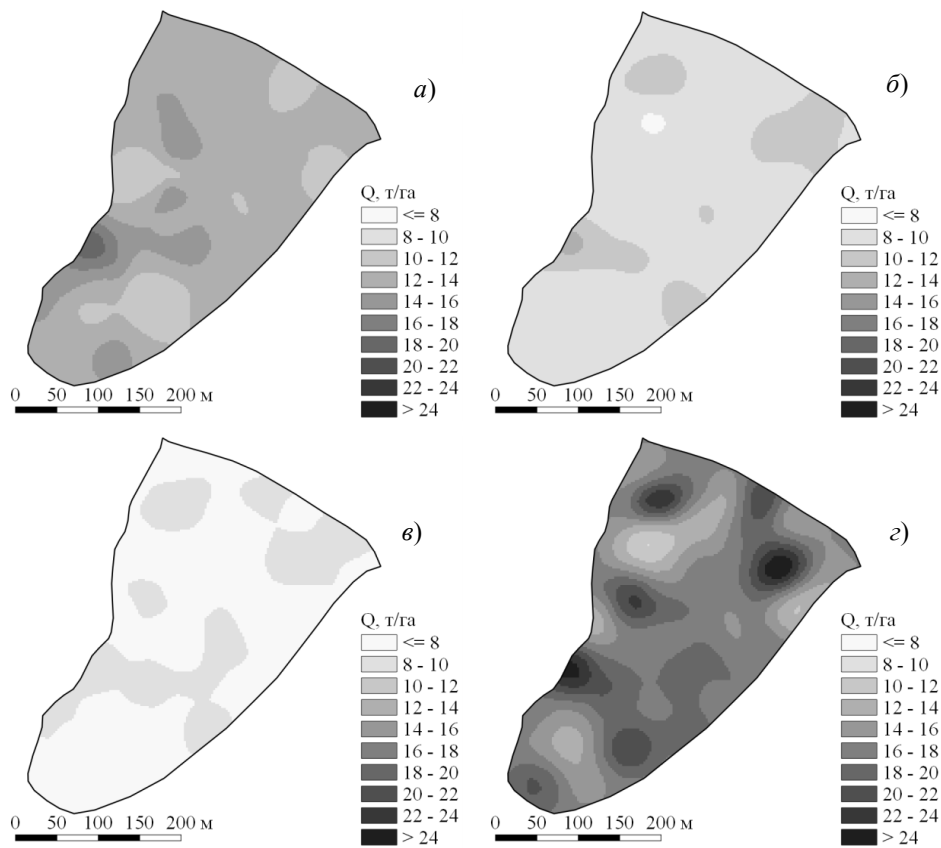


Рис. 5. Запасы гумуса по слоям старопашотного горизонта: а) 0–5 см; б) 5–10 см; в) 10–15 см; г) 15–*b* см

где m – прогнозируемое содержание ПОВ в интерполируемой точке в %; h – мощность слоя в интерполируемой точке (для верхних трех слоев значение $h = 5$ см, для слоя 15–*b* мощность рассчитывается как $h = b - 15$ см, где b – прогнозируемая мощность Апах); d_v – прогнозируемое значение плотности сложения в интерполируемой точке ($\text{г}/\text{см}^3$). Были получены карты оценки запасов гумуса в слоях 0–5, 5–10, 10–15 и 15–*b* см (рис. 4) и общий запас гумуса в пашотном горизонте (рис. 5).

В табл. 4 представлены статистические показатели запасов гумуса по слоям, рассчитанные на основе интерполированных картограмм.

Табл. 4

Статистические показатели рассчитанных запасов гумуса по слоям

Слой	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации. %
0–5 см	10.27	19.08	13.03	1.17	9.0
5–10 см	7.80	12.51	9.36	0.73	7.8
10–15 см	6.62	9.49	7.86	0.40	5.1
15– <i>b</i> см	10.00	25.87	17.28	2.46	14.2
0– <i>b</i> см	38.11	65.71	47.53	3.58	7.5

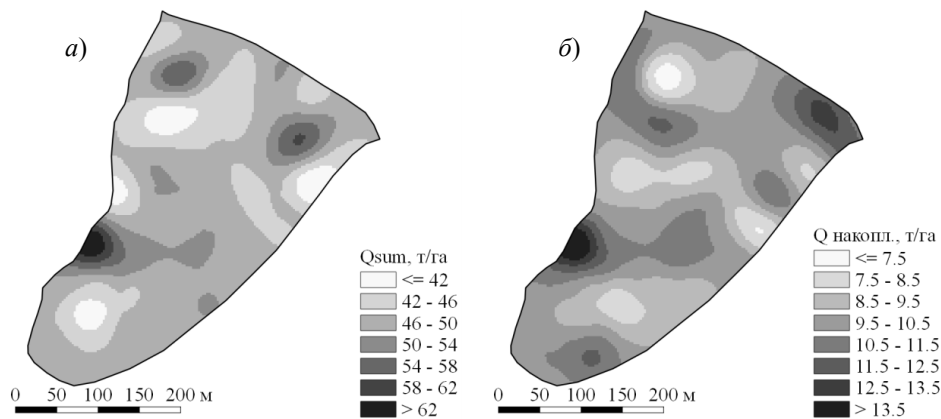


Рис. 6. Общий запас гумуса в старопахотном горизонте (а) и накопленные запасы гумуса в слое 0–15 см (б), в т/га

Анализ рассчитанных запасов гумуса показывает, что от слоя 0–5 см к слою 10–15 см идет закономерное его снижение с 13.03 до 7.86 т/га, что можно объяснить преимущественным накоплением в верхней части старопахотного горизонта. При этом показатели пространственного варьирования имеют весьма значительные величины, даже с учетом сглаживания дисперсии при применении для интерполяции метода кригинга. Можно сделать вывод, что традиционная оценка, приводимая на верхний слой старопахотного горизонта (обычно 0–20 или 0–25 см) может не отражать реальных запасов гумуса в пахотном слое. В то же время расчет на большую мощность верхней части профиля залежной почвы (0–30, 0–40 или 0–50 см) показывает увеличение вклада бедных гумусом подпахотных горизонтов и уменьшение доли накопленного под залежами гумуса.

Общий запас гумуса в толще старопахотного горизонта, полученный с применением методов интерполяции составил 47.5 т/га (табл. 4), а величина, рассчитанная по средним значениям, приведенным в табл. 1, составила 51.9 т/га. Данные отличаются примерно на 10%. Разница в запасах невысокая, но использованные средние значения (содержание гумуса – 1.33%, средней плотности сложения – 1.46 г/см³ и мощности – 26.7 см) были получены на основе детального послойного изучения старопахотного горизонта. Особого внимания заслуживает размах варьирования запасов гумуса на отдельных участках обследованной территории, который составляет 30.6 т/га и соизмерим по величине с общим запасом гумуса.

Из анализа данных можно сделать выводы о методических аспектах проведения пробоотбора при исследовании залежных почв. Применение точечных обследований (по единичным разрезам) или с заложением нескольких точек пробоотбора, характеризующим небольшой участок изучаемой территории при таких показателях варьирования неизбежно приведет к смещенности оценок, так как очень сильное влияние на получаемый результат будет оказывать место заложения точек пробоотбора. Такой подход можно отнести к достаточно произвольной экстраполяции, по определению В.П. Самсоновой [33], результатов, получаемых по единичным объектам обследования, на окружающую территорию или на аналогичные почвенные объекты. Более объективные результаты можно получить при исследовании смешанных образцов, но они должны быть

составлены из точек, заложенных по плотной систематической решетке, охватывающей всю исследуемую территорию, а глубина отбора образцов должна соответствовать вариабельности нижней границы пахотного слоя.

Расчет накопленных запасов гумуса. Было сделано предположение, что за 15 лет нахождения участка под залежной растительностью существенное накопление ПОВ происходило только в верхних слоях старопахотного горизонта, а его содержание в слое ниже 15 см примерно соответствует содержанию в исходной пахотной почве. Тогда разницу в содержании ПОВ в верхних слоях (0–5, 5–10, 10–15 см) и содержанием в нижнем слое (15–*b* см) можно считать примерно соответствующим ОВ, накопленному в старопахотном горизонте за время нахождения почвы под залежной растительностью. Было показано, что уменьшение среднего значения данной величины с глубиной уверенно описывается экспоненциальной функцией:

$$Y = 2.355 \exp(-0.301X), \quad (8)$$

где *X* – средняя глубина отбора пробы, *Y* – разница в содержании ПОВ между верхним и нижним слоями.

Достоверность аппроксимации (R^2) составила 0.996, усредненная ошибка (ME) равна –0.02, стандартная ошибка аппроксимации (RSME) – 0.01.

По полученной эмпирической модели была проведена экстраполяция величины накопления ПОВ на глубину 17.5 см (то есть слой 15–20 см), которая составила +0.015%, то есть 1.5% от содержания ОВ в слое 15–*b* см, что находится в пределах ошибки и не может внести существенный вклад в оценку накопленных запасов. Результаты представлены на рис. 6.

Сравнение карт общих и накопленных запасов гумуса показывает, что они схожи, но есть участки, по которым наблюдаются различия. Из визуального анализа можно сделать вывод, что исходное содержание гумуса в пахотной почве не является основным фактором, определяющим интенсивность вторичного накопления гумуса под залежами. Среднее содержание накопленного ПОВ в слое 0–15 см составило 9.9 т/га, что соответствует 33% от общего его запаса в этом слое (30.3 т/га) или 21% от общего запаса в старопахотном горизонте в целом (47.5 т/га). Вместе с тем содержание накопленного гумуса характеризуется высокой вариабельностью, минимальное накопление составляет 6.8 т/га, а максимальное – 14.8 т/га.

Заключение

На основе полученных данных можно заключить, что применение специальных схем пробоотбора и геостатистических методов интерполяции позволяет получить реалистичную оценку запасов гумуса в старопахотном слое с учетом пространственной горизонтальной и вертикальной изменчивости содержания в нем ПОВ, плотности сложения и его мощности. Аккумуляция гумуса происходит главным образом в верхней части старопахотного горизонта, а его количество, накопленное за 15 лет нахождения под залежной растительностью, может достигать до 21% от общего запаса.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-04-00846.

Литература

1. Larionova A.A., Yermolaev A.M., Blagodatsky S.A., Rozanova L.N., Yevdokimov I.V., Orlynsky D.B. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use // *Biol. Fertil. Soil.* – 1998. – V. 27, No 3. – P. 251–257. – doi: 10.1007/s003740050429.
2. Курганова И. Н., Ермолаев А. М., Лопес де Гереню В. О., Ларионова А. А., Кузяков Я., Келлер Т., Ланге Ш. Баланс углерода в почвах залежей подмосковья // *Почвоведение.* – 2007. – № 1. – С. 60–68.
3. Dugas W.A., Heuer M.L., Mayeux H.S. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum // *Agricult. Forest Meteorol.* – 1999. – V. 93, No 2. – P. 121–139. – doi: 10.1016/S0168-1923(98)00118-X.
4. Sims L.P., Bradford J.A. Carbon dioxide fluxes in a Southern Plains prairie // *Agric. For. Meteorol.* – 2001. – V. 109, No 2. – P. 117–134. – doi: 10.1016/S0168-1923(01)00264-7.
5. Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stock and land use change: A meta analysis // *Global Change Biol.* – 2002. – V. 8, No 4. – P. 345–360. – doi: 10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.
6. Карелин Д.В., Люри Д.И., Горячкин С.В., Лунин В.Н., Кудиков А.В. Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи // *Почвоведение.* – 2015. – № 11. – С. 1354–1366.
7. Кузнецова И.В., Тихонравова П.И., Бондарев А.Г. Изменение свойств залежных серых лесных почв // *Почвоведение.* – 2009. – № 9. – С. 1142–1150.
8. Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Почикалов А.В., Кудеяров В.Н. Физические свойства и изменение запасов углерода серых лесных почв в ходе постагрогенной эволюции (юг Московской области) // *Почвоведение.* – 2017. – № 3. – С. 75–83.
9. Сорокина Н.П., Козлов Д.Н., Кузнецова И.В. Оценка постагрогенной трансформации дерново-подзолистых почв: картографическое и аналитическое обоснование // *Почвоведение.* – 2013. – № 10. – С. 1193–1205.
10. Kurganova I.N., Kudeyarov V.N., De Gereny L. Updated estimate of carbon balance on Russian territory // *Tellus.* – 2010. – V. 62, No 5. – P. 497–505. – doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00467.x.
11. Mueller C.W., Koegel-Knabner I. Soil organic carbon stocks, distribution, and composition affected by historic land use changes on adjacent sites // *Biol. Fertil. Soils.* – 2009. – V. 45, No 4. – P. 347–359. – doi: 10.1007/s00374-008-0336-9.
12. Ерохова А.А., Макаров М.И., Моргун Е.Г., Рыжова И.М. Изменение состава органического вещества дерново-подзолистых почв в результате естественного восстановления леса на пашне // *Почвоведение.* – 2014. – № 11. – С. 1308–1314.
13. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Изменение гумусного состояния дерново-подзолистой глееватой песчаной почвы на залежи // *Почвоведение.* – 2007. – № 11. – С. 1323–1329.
14. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Т. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. – М.: ГЕОС, 2010. – 416 с.
15. Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisols: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools // *Geoderma.* – 2013. – V. 207–208. – P. 221–233. – doi: 10.1016/j.geoderma.2013.05.019.
16. Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги // *Почвоведение.* – 2014. – № 12. – С. 1426–1435.

17. Романовская А.А. Органический углерод в почвах залежных земель России // Почвоведение. – 2006. – № 1. – С. 52–61.
18. Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудиков А.В., Лопес де Гереню В.О., Лукин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И. Изменение запасов углерода и эмиссии CO₂ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в Европейской части России // Почвоведение. – 2017. – № 5. – С. 580–594.
19. Телеснина В.М., Ваганов И.Е., Карлсен А.А., Иванова А.Е., Жуков М.А., Лебедев С.М. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) // Почвоведение. – 2016. – № 1. – С. 115–129.
20. Гиниятуллин К.Г., Шинкарев А.А., Фазылова А.Г., Кузьмина К.И., Шинкарев А.А. (мл.). Пространственная неоднородность вторичной аккумуляции гумуса в старопашотных горизонтах залежных светло-серых лесных почв // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2012. – Т. 154, кн. 4. – С. 61–70.
21. Гиниятуллин К.Г., Мухаметгалиева Г.Я., Латыпова А.И. Применение различных подходов к репрезентативному пробоотбору при изучении гумусонакопления в залежных почвах // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2013. – Т. 155, кн. 3. – С. 208–220.
22. Kerry R., Oliver V.A., Frogbrook Z.L. Sampling in precision agriculture // Geostatistical Applications for Precision Agriculture / Ed. by M.A. Oliver. – Springer, 2010. – P. 35–64.
23. Walvoort D.J.J., Brus D.J., de Gruijter J.J. An R package for spatial coverage sampling and random sampling from compact geographical strata by *k*-means // Comput. Geosci. – 2010. – V. 36, No 10. – P. 1261–1267. – doi: 10.1016/j.cageo.2010.04.005.
24. Pebesma E.J. Multivariable geostatistics in S: The gstat package // Comp. Geosci. – 2004. – V. 30, No 7. – P. 683–691. – doi: 10.1016/j.cageo.2004.03.012.
25. Савельев А.А., Мухарамова С.С., Пилюгин А.Г., Чижикова Н.А. Геостатистический анализ данных в экологии и природопользовании (с применением пакета R). – Казань: Казан. ун-т, 2012. – 120 с.
26. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. – Vienna, Austria, 2016.
27. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. – 2016. – URL: <http://qgis.osgeo.org>.
28. McBratney A. Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information // Nutr. Cycling Agroecosyst. – 1998. – V. 50, No 1–3. – P. 51–62. – doi: 10.1023/A:1009778500412.
29. Hengl T. Finding the right pixel size // Comput. Geosci. – 2006. – V. 32, No 9. – P. 1283–1298. – doi: 10.1016/j.cageo.2005.11.008.
30. Li J., Heap A. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists: Geoscience Australia Record 2008/23. – Canberra: Geosci. Aust., 2008. – 154 p.
31. Bivand R., Pebesma E., Gomez-Rubio V. Applied Spatial Data Analysis with R. – N. Y.: Springer, 2013. – 413 p. – doi: 10.1007/978-1-4614-7618-4.
32. Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: На примере дерново-подзолистых почв. – М.: ЛКИ, 2008. – 160 с.

Поступила в редакцию
11.01.19

Гиниятуллин Камиль Гашикович, кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: giniyatullin@mail.ru

Рязанов Станислав Сергеевич, научный сотрудник лаборатории экологии почв

Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, д. 28, г. Казань, 420087, Россия
E-mail: erydit@yandex.ru

Смирнова Елена Васильевна, кандидат биологических наук, заведующий кафедрой почвоведения

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: elenavsmirnova@mail.ru

Латыпова Лейсан Илдаровна, аспирант кафедры почвоведения

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: leisana-2009@mail.ru

Рыжих Людмила Юрьевна, кандидат сельскохозяйственных наук, ассистент кафедры почвоведения

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: ludarigih@mail.ru

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2019, vol. 161, no. 2, pp. 275–292

doi: 10.26907/2542-064X.2019.2.275-292

**Using Geostatistical Methods
for Evaluating Organic Matter Reserves
in Fallow Soils**

K.G. Giniyatullin^{a}, S.S. Ryazanov^{b**}, E.V. Smirnova^{a***},
L.I. Latypova^{a****}, L.Yu. Ryzhikh^{a*****}*

^a*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

^b*Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use,
Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, 420087 Russia*

E-mail: * giniyatullin@mail.ru, ** erydit@yandex.ru, *** elenavsmirnova@mail.ru,
**** leisana-2009@mail.ru, ***** ludarigih@mail.ru

Received January 11, 2019

Abstract

In the samples taken layer by layer (every 5 cm) from the old arable horizon of fallow light gray forest soils, the content of organic matter and the bulk density were determined in order to calculate humus reserves. All samples were taken from 50 sampling points distributed along the study site according to a stratified random pattern. The amount of humus reserves was calculated using the geostatistical interpolation methods with regard to the spatial, horizontal, and vertical variability of organic matter content in the old arable horizon, as well as its bulk density and thickness. The results obtained show that the accumulation of soil organic matter (SOM) under deposits occurs primarily in the upper part of

the topsoil horizon; the amount of humus that accumulated over 15 years under fallow vegetation is 21% of the total reserve. This paper also discusses the methodological aspects of soil sampling for unbiased estimate of humus reserves.

Keywords: fallow soils, organic matter reserves, geostatistics

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 17-04-00846).

Figure Captions

Fig. 1. Sampling scheme.

Fig. 2. Variograms of humus reserves, layer by layer: *a*) 0–5 cm; *b*) 5–10 cm; *c*) 10–15 cm; *d*) 15–*b* cm and the lower boundary of the arable horizon (*e*).

Fig. 3. Spatial distribution of humus reserves, layer by layer: *a*) 0–5 cm; *b*) 5–10 cm; *c*) 10–15 cm; *d*) 15–*b* cm and the depth of the lower boundary of the arable horizon (*e*).

Fig. 4. Spatial distribution of the bulk density.

Fig. 5. Humus reserves in the old arable horizon, layer by layer: *a*) 0–5 cm; *b*) 5–10 cm; *c*) 10–15 cm; *d*) 15–*b* cm.

Fig. 6. Total humus reserves in the old arable horizon (*a*) and accumulated humus reserves in the layer of 0–15 cm (*b*), t/ha.

References

1. Larionova A.A., Yermolaev A.M., Blagodatsky S.A., Rozanova L.N., Yevdokimov I.V., Orlinsky D.B. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use. *Biol. Fertil. Soils*, 1998, vol. 27, no. 3, pp. 251–257. doi: 10.1007/s003740050429.
2. Kurganova I.N., Yermolaev A.M., Lopes de Gerenyu V.O., Larionova A.A., Kuzyakov Ya., Keller T., Lange S. Carbon balance in the soils of abandoned lands in Moscow region. *Eurasian Soil Sci.*, 2007, vol. 40, no. 1, pp. 51–58. doi: 10.1134/S1064229307010085.
3. Dugas W.A., Heuer M.L., Mayeux H.S. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. *Agric. For. Meteorol.*, 1999, vol. 93, no. 2, pp. 121–139. doi: 10.1016/S0168-1923(98)00118-X.
4. Sims L.P., Bradford J.A. Carbon dioxide fluxes in a Southern Plains prairie. *Agric. For. Meteorol.*, vol. 109, no. 2, pp. 117–134. doi: 10.1016/S0168-1923(01)00264-7.
5. Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stock and land use change: A meta analysis. *Global Change Biol.*, 2002, vol. 8, no. 4, pp. 345–360. doi: 10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.
6. Karelin D.V., Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Lunin V.N., Kudikov A.V. Changes in the carbon dioxide emission from soils in the course of postagrogenic succession in the Chernozems forest-steppe. *Eurasian Soil Sci.*, 2015, vol. 48, no. 11, pp. 1229–1241. doi: 10.1134/S1064229315110095.
7. Kuznetsova I.V., Tikhonravova P.I., Bondarev A.G. Changes in the properties of cultivated gray forest soils after their abandoning. *Eurasian Soil Sci.*, 2009, vol. 42, no. 9, pp. 1062–1070. doi: 10.1134/S1064229309090142.
8. Baeva Y.I., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Pochikalov A.V., Kudeyarov V.N. Changes in physical properties and carbon stocks of gray forest soils in the southern part of Moscow region during postagrogenic evolution. *Eurasian Soil Sci.*, 2017, vol. 50, no. 3, pp. 327–334. doi: 10.1134/S1064229317030024.
9. Sorokina N.P., Kozlov D.N., Kuznetsova I.V. Assessment of the postagrogenic transformation of soddy-podzolic soils: Cartographic and analytic support. *Eurasian Soil Sci.*, 2013, vol. 46, no. 10, pp. 1007–1019. doi: 10.1134/S1064229313100074.
10. Kurganova I.N., Kudeyarov V.N., De Gerenyu L. Updated estimate of carbon balance on Russian territory. *Tellus*, 2010, vol. 62, no. 5, pp. 497–505. doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00467.x.
11. Mueller C.W., Koegel-Knabner I. Soil organic carbon stocks, distribution, and composition affected by historic land use changes on adjacent sites. *Biol. Fertil. Soils*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 347–359. doi: 10.1007/s00374-008-0336-9.

12. Erokhova A.A., Makarov M.I., Morgun E.G., Ryzhova I.M. Effect of the natural reforestation of an arable land on the organic matter composition in soddy-podzolic soils. *Eurasian Soil Sci.*, 2014, vol. 47, no. 11, pp. 1100–1106. doi: 10.1134/S1064229314110040.
13. Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu. Changes in the humus status of a layland sandy gleyic soddy-podzolic soil. *Eurasian Soil Sci.*, 2007, vol. 40, no. 11, pp. 1181–1186. doi: 10.1134/S1064229307110051.
14. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.T. *Dinamika sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti pochv* [The Dynamics of Agricultural Lands in Russia during the 20th Century and the Postagrogenic Restoration of Vegetation and Soils]. Moscow, GEOS, 2010. 416 p. (In Russian)
15. Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisols: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools. *Geoderma*, 2013, vols. 207–208, pp. 221–233. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.05.019.
16. Ryzhova I.M., Erokhova A.A., Podvezennaya M.A. Dynamics and structure of carbon storage in the postagrogenic ecosystems of the southern taiga. *Eurasian Soil Sci.*, 2014, vol. 47, no. 12, pp. 1207–1215. doi: 10.1134/S1064229314090117.
17. Romanovskaya A.A. Organic carbon in long-fallow lands of Russia. *Eurasian Soil Sci.*, 2006, vol. 39, no. 1, pp. 44–52. doi: 10.1134/S1064229306010066.
18. Karelin D.V., Goryachkin S.V., Kudikov A.V., Lopes de Gerenu V.O., Lunin V.N., Dolgikh A.V., Lyuri D.I. Changes in carbon pool and CO₂ emission in the course of postagrogenic succession on gray soils (Luvic Phaeozems) in European Russia. *Eurasian Soil Sci.*, 2017, vol. 50, no. 5, pp. 559–572. doi: 10.1134/S1064229317050076.
19. Telesnina V.M., Vaganov I.E., Karlsen A.A., Ivanova A.E., Zhukov M.A., Lebedev S.M. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga, Kostroma oblast. *Eurasian Soil Sci.*, 2016, vol. 49, no. 1, pp. 102–115. doi: 10.1134/S1064229316010117.
20. Giniyatullin K.G., Shinkarev A.A., Fazylova A.G., Kuzmina K.I., Shinkarev A.A., Jr. Spatial heterogeneity of the secondary humus accumulation in old arable horizons of fallow light-grey forest soils. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2012, vol. 154, no. 4, pp. 61–70. (In Russian)
21. Giniyatullin K.G., Mukhametgalieva G.Ya., Latypova A.I. Application of various approaches to representative sampling for studying humus accumulation in fallow soils. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2013, vol. 155, no. 3, pp. 208–220. (In Russian)
22. Kerry R., Oliver V.A., Frogbrook Z.L. Sampling in precision agriculture. In: Oliver M.A. (Ed.) *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer, 2010, pp. 35–64.
23. Walvoort D.J.J., Brus D.J., de Gruijter J.J. An R package for spatial coverage sampling and random sampling from compact geographical strata by *k*-means. *Comput. Geosci.*, 2010, vol. 36, no. 10, pp. 1261–1267. doi: 10.1016/j.cageo.2010.04.005.
24. Pebesma E.J. Multivariable geostatistics in S: The gstat package. *Comput. Geosci.*, 2004, vol. 30, no. 7, pp. 683–691. doi: 10.1016/j.cageo.2004.03.012.
25. Savel'ev A.A., Mukharamova S.S., Pilyugin A.G., Chizhikova N.A. *Geostatisticheskii analiz dannykh v ekologii i prirodopol'zovanii (s primineniem paketa R)* [Geostatistical Data Analysis in Ecology and Environmental Management (Using the R Package)]. Kazan, Kazan. Univ., 2012. 120 p. (In Russian)
26. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2016.
27. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 2016. Available at: <http://qgis.osgeo.org>.
28. McBratney A. Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 1998, vol. 50, nos. 1–3, pp. 51–62. doi: 10.1023/A:1009778500412.
29. Hengl T. Finding the right pixel size. *Comput. Geosci.*, 2006, vol. 32, no. 9, pp. 1283–1298. doi: 10.1016/j.cageo.2005.11.008.
30. Li J., Heap A. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists: Geoscience Australia Record 2008/23*. Canberra, Geosci. Aust., 2008. 154 p.

31. Bivand R., Pebesma E., Gomez-Rubio V. *Applied Spatial Data Analysis with R*. New York, Springer, 2013. 413 p. doi: 10.1007/978-1-4614-7618-4.
32. Samsonova V.P. *Prostranstvennaya izmenchivost' pochvennykh svoistv: Na primere dernovo-podzolistykh pochv* [Spatial Variability of Soil Properties: Based on Soddy Podzolic Soils]. Moscow, LKI, 2008. 160 p. (In Russian)

Для цитирования: Гиниятуллин К.Г., Рязанов С.С., Смирнова Е.В., Латыпова Л.И., Рыжих Л.Ю. Использование геостатистических методов для оценки запасов органического вещества в залежных почвах // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2019. – Т. 161, кн. 2. – С. 275–292. – doi: 10.26907/2542-064X.2019.2.275-292.

For citation: Giniyatullin K.G., Ryazanov S.S., Smirnova E.V., Latypova L.I., Ryzhikh L.Yu. Using geostatistical methods for evaluating organic matter reserves in fallow soils. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2019, vol. 161, no. 2, pp. 275–292. doi: 10.26907/2542-064X.2019.2.275-292. (In Russian)