

## Использование мультифункционального подхода для картографического моделирования содержания органического углерода в естественных и пахотных почвах Центрального Кавказа

Р. Х. Темботов

*Институт экологии горных территорий им. А. К. Темботова РАН  
Нальчик, 360051, Россия  
E-mail: tembotov.rustam@mail.ru*

На основе полученной информации о содержании в почвах органического углерода и материалов дистанционного зондирования, с использованием технологии цифрового моделирования и картографирования почв создана картографическая модель, отражающая пространственное варьирование содержания органического углерода в верхних горизонтах (0–20 см) почв Центрального Кавказа. Для моделирования был применён мультифункциональный подход, подразумевающий совмещение фактических данных о содержании органического углерода (обучающая выборка) со сведениями, полученными из внешних источников информации (данные дистанционного зондирования Земли) и обработанными с применением пошагового дискриминантного анализа. С помощью статистических методов анализа установлена необходимость создания модели распределения органического углерода в почвах отдельно для искусственных (агроценозы) и естественных биогеоценозов. В результате совмещения двух гипотетических моделей получена верифицированная модель, отражающая реальную картину изменения содержания органического углерода в почвах Центрального Кавказа. Достоверность модели составила 68 %. В ней содержатся актуальные данные о содержании органического углерода в естественных и агрогенных почвах Центрального Кавказа. Построенная модель является необходимым инструментом для принятия решений, направленных на сохранение или увеличение текущих запасов почвенного углерода в условиях изменения климата и возрастающего антропогенного воздействия.

**Ключевые слова:** содержание органического углерода, картографические модели, дискриминантный анализ, Landsat, SRTM, WorldClim

Одобрена к печати: 20.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-193–206

### Введение

Уровень содержания органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) — один из важнейших критериев плодородия почвы, индикатор её качества и устойчивости к различным видам воздействия. При участии  $C_{\text{орг}}$  формируются и поддерживаются свойства, режимы и функции почв — агроэкологические, санитарно-защитные, социально-экономические и пр. (Чинилин, Савин, 2022; Lefèvre et al., 2017; Ma et al., 2023). Установлено, что во всех почвах мира в слое мощностью 100 см хранится (по разным расчётам) от 1500 до 2300 Гт углерода, что в два-три раза превышает размер всего атмосферного пула углерода, составляющего около 760 Гт (Jobbágy, Jackson, 2000; Lefèvre et al., 2017; Showstack, 2003). Как показывают исследования последних лет, изменение климата способствует ускорению минерализации  $C_{\text{орг}}$  почвы и представляется значительным источником парниковых газов в атмосфере (Abakumov et al., 2019; Knoblauch et al., 2013). Особенно интенсивно указанные процессы происходят в пахотных почвах, для которых характерна ускоренная минерализация органического вещества. Актуальность вопросов изучения и оценки содержания почвенного  $C_{\text{орг}}$  отражена в ряде крупных международных проектов («Глобальное почвенное партнёрство по рекарбонизации почв»; Инициатива «4 на 1000»). Важным направлением их работы становится смягчение последствий изменения климата посредством сохранения запасов углерода в составе  $C_{\text{орг}}$  почвы (Minasny et al., 2017; Recarbonization..., 2020).

Таким образом, возрастает потребность в адекватной информации о пространственном варьировании содержания  $C_{орг}$  как в естественных, так и сельскохозяйственных почвах. При этом необходимо создание таких информационных продуктов, которые позволят эффективно использовать, визуально отображать и актуализировать весь комплекс имеющихся данных. Следует отметить, что картирование пространственного изменения содержания  $C_{орг}$  в почвах требует большого количества фактического материала и оказывается дорогостоящим и трудоёмким процессом. Существенно ускорить создание информационного продукта и сделать его менее трудозатратным возможно с помощью применения статистических методов и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Исследования, проведённые в Европе (Castaldi et al., 2018; Szatmári et al., 2021; Zhou et al., 2021), Китае (Dou et al., 2019; Liang et al., 2019), Бразилии (Gomes et al., 2019) и других странах (Angelopoulou et al., 2019; Bhunia et al., 2019), подтвердили успешное использование спутниковых данных и статистических методов для картирования содержания  $C_{орг}$ . Наиболее масштабным международным проектом, посвящённым этому вопросу, стала карта глобального распределения  $C_{орг}$  в верхнем (0–30 см) слое почв Земли (Global..., 2020).

Многие работы отечественных авторов направлены на решение проблемы оценки и картографирования содержания  $C_{орг}$  в почвах России (Бирюкова, Бирюков, 2011; Щепаченко и др., 2013; Rozhkov et al., 1996; Stolbovoi, 2002). Анализ публикаций по данному вопросу показал, что наиболее распространённым выступает подход, при котором в качестве основы используется контурная часть мелкомасштабных почвенных карт, где каждый полигон получает присвоение среднего значения содержания  $C_{орг}$  для всех почв, входящих в состав того или иного контура. Но содержание  $C_{орг}$  — показатель, обладающий высокой пространственной вариабельностью, на его величину влияет целый комплекс различных факторов и он не всегда остаётся постоянным в границах выдела на почвенной карте, что может привести к накоплению ошибок и снижению достоверности таких карт. Исследования содержания  $C_{орг}$  в почвах с применением данных дистанционного зондирования и статистических методов анализа проводились и в различных регионах России. Например, в Республике Башкортостан на основе спутниковых данных (Sentinel-2A) и методов линейной регрессии создали достаточно достоверные картографические модели, отображающие содержание  $C_{орг}$  в южных чернозёмах (Suleymanov et al., 2021). В пахотных чернозёмах Курской биосферной станции проводили пространственно-временной мониторинг содержания  $C_{орг}$  с использованием спектральных характеристик спутников. Авторы установили эффективность применения оценённого по данным ДЗЗ LS-фактора (*англ.* Slope length and steepness factor, эрозионный потенциал рельефа) для прогноза содержания углерода в старопахотных типичных чернозёмах в крупном пространственном масштабе (Карелин, Цымбарович, 2022). Применение отражательной способности светло-серых лесных почв Республики Татарстан показало, что использование отражения в красном канале для ковариационного кригинга позволяет получить более точный пространственный прогноз распределения  $C_{орг}$  при минимальном наборе данных по сравнению с ординарным кригингом (Гиниятуллин и др., 2022).

В настоящей работе используется так называемый мультифункциональный подход, в рамках которого исследуется множество пространственных связей, которые определяются в форме функциональных зависимостей между различными характеристиками почв через их связь с отражённой солнечной радиацией, комплексом климатических данных и особенностями различных форм рельефа (Кренке, 2011; Пузаченко и др., 2006; Темботов и др., 2022). Применение такого подхода представляется оптимальным для создания карт, отражающих пространственное варьирование почвенных показателей, так как эти методы позволяют добиться большей точности в сочетании с оперативностью получения информации, что существенно снижает стоимость конечного продукта и повышает скорость и качество картирования территории (Савин, 2016, 2022; Elbeih, 2021; Minasny, McBratney, 2016).

Цель работы состоит в создании карты, отражающей содержание  $C_{орг}$  в верхнем горизонте (0–20 см) естественных и пахотных почв Центрального Кавказа (в пределах равнинно-предгорной части Кабардино-Балкарской Республики), на основе мультифункционального подхода, объединяющего комплекс данных полевых, лабораторных и дистанционных методов исследования.

## Материалы и методы

Объектом исследования стали 11 типов и подтипов естественных и пахотных почв, составляющих почвенный покров равнинно-предгорной части Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии). Общая площадь картируемой территории составила 5275 км<sup>2</sup>.

Методика, используемая при моделировании и картографировании, основана на совместном анализе фактических данных о содержании  $C_{\text{орг}}$  (%) в изученных почвах (обучающая выборка) и ландшафтных характеристик, полученных из независимых источников измерения (данные ДЗЗ). Подобный подход ранее использовался группой под руководством Ю. Г. Пузаченко для изучения и картографирования различных элементов ландшафта (Корзников и др., 2020; Кренке, Пузаченко, 2008; Пузаченко, Черненко, 2016).

Обучающая выборка, использованная в настоящей работе, получена на основе данных полевых исследований, проводимых ежегодно (с 2011 г.) в первую декаду июля, чтобы избежать сезонного варьирования содержания  $C_{\text{орг}}$  в почвах. Смешанные образцы отбирали методом конверта из верхнего горизонта (0–20 см) на мониторинговых площадках, расположенных в естественных и агрогенных биогеоценозах (рис. 1).

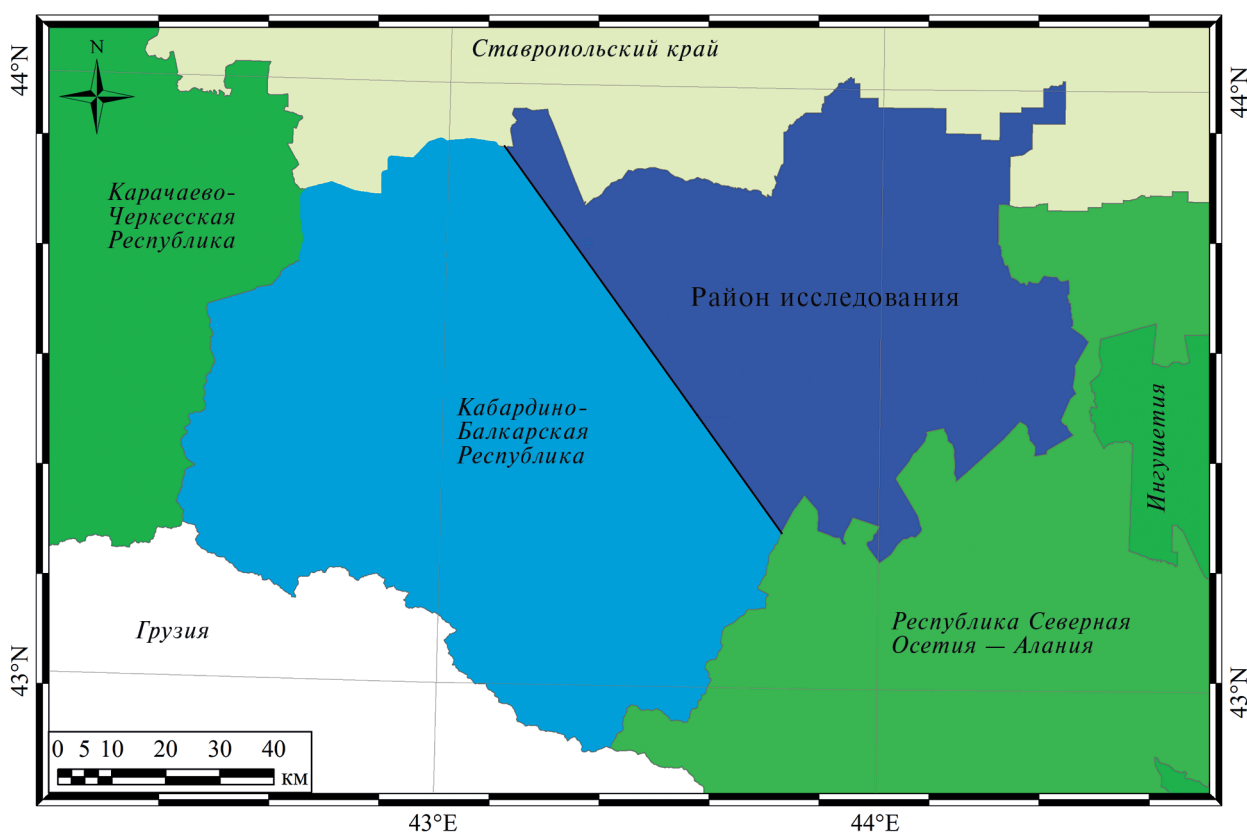


Рис. 1. Район исследования: Центральный Кавказ, равнинно-предгорная часть Кабардино-Балкарии

Отбор и подготовка почвы для лабораторных исследований проводились в соответствии с общепринятыми в почвоведении и экологии методами (Вальков и др., 2002). Всего было исследовано 370 образцов, содержание органического вещества определяли по методу Тюрина в модификации Никитина (Казеев и др., 2003). Лабораторные исследования проводили в трёхкратной аналитической повторности. Для формирования групп, объединяющих почвы с различным содержанием  $C_{\text{орг}}$  (низкое, среднее, высокое и т. д.), использовали градацию, предложенную авторами работы (Бирюкова, Бирюков, 2011).

Внешние переменные, использованные в работе, объединяли данные ДЗЗ и состояли из сведений, содержащихся в мультиспектральных снимках спутников Landsat-5, -8, в наборе биоклиматических показателей из глобальной базы WorldClim и информации о рельефе, полученной на основе SRTM (*англ.* Shuttle radar topographic mission — радиолокационная топографическая миссия шаттла).

Использовались два одномоментных снимка со спутников Landsat-5, -8, характеристики которых представлены в *табл. 1*. Из мультиспектральных снимков спутников Landsat получены значения спектральной яркости каналов, на основе которых рассчитаны разнообразные (вегетационные, почвенные) индексы, которые отражают соотношения между каналами съёмки, а также различные термодинамические переменные (Попов, 2016; Сандлерский, Пузаченко, 2009).

Таблица 1. Характеристика используемых сцен спутниковой информации

Дата съёмки	Съёмочная система	Уникальный номер сцены (ID)	Координаты сцены (левый верхний угол)	Время съёмки
26 июля 2011 г.	Landsat-5 TM	LT51710302011207MOR00	44° 07' 34,72" с. ш. 42° 36' 05,58" в. д.	07:38:11
18 июля 2020 г.	Landsat-8 OLI-TIRS	LC81710302020200LGN00	44° 13' 44,87" с. ш. 41° 59' 59,89" в. д.	07:49:00

Примечание: TM — *англ.* Thematic Mapper; OLI — *англ.* Operational Land Imager; TIRS — *англ.* Thermal Infrared Sensor.

Климатические данные, источником которых стала база WorldClim, представляли собой 19 биоклиматических характеристик (BioClim). Они отражают: годовые тренды (среднегодовой температуры и годового количества осадков), сезонность (годовой диапазон температуры и распределение осадков), а также экстремальные или ограничивающие факторы окружающей среды — температуру самого холодного и самого тёплого месяцев, количество осадков в наиболее влажных и засушливых кварталах года (Karger et al., 2017).

Информация о рельефе получена благодаря SRTM — международной миссии по сбору и накоплению данных о рельефе (Yang et al., 2011). На основе имеющихся материалов формируется цифровая модель рельефа Земли, с помощью которой можно оценить такие характеристики рельефа исследуемой территории, как градиент, средняя кривизна, лапласиан и освещённость. Так как рельеф оказывает влияние на перераспределение тепла и влаги, а также на гидротермический режим почв на микро-, мезо- и макроуровне, морфометрические показатели оцениваются для каждого уровня рельефа (Пузаченко и др., 2002).

Объединение всех внешних переменных позволило сформировать базу данных, где для каждой точки-пикселя (квадрат с размером 150×150 м) получено отображение её мультиспектральных, климатических и рельефных характеристик. Далее к полученной базе были добавлены данные обучающей выборки. Это даёт возможность для интерполяции полученных при исследованиях фактических данных (содержание  $C_{орг}$  в почвах 370 мониторинговых площадок) на всю картируемую территорию. В настоящей работе интерполяция проведена с применением пошагового дискриминантного анализа, который доказал свою эффективность при использовании большого количества внешних переменных (Кренке, 2011; Попов, 2016).

Для достоверного моделирования и верификации полученной картографической модели совокупность фактических данных о содержании  $C_{орг}$  в изученных почвах разделили на два подмножества. Первое подмножество (320 точек) использовалось для создания модели, а остальные данные (50 точек) применили для проверки полученной модели. Разделение выборки проводилось методом рандомизации с помощью функции Subset/Random Sampling в программе Statistica 12.0.

Работа с векторными и растровыми данными велась в программных продуктах ENVI 5.3, ERDAS Imagine 2014, а также Fracdim 15. Статистическая обработка данных, дискриминантный и мультирегрессионный анализ проведены в программе Statistics Services 12.0.

## Результаты и обсуждение

На основании данных, полученных при исследовании естественных и обрабатываемых почв исследуемых территорий, установлено, что сельскохозяйственное использование приводит к существенному изменению содержания  $C_{\text{орг}}$  (%) в пахотных горизонтах (0–20 см) (табл. 2).

Таблица 2. Статистическое описание содержания  $C_{\text{орг}}$  (%) в верхних горизонтах (0–20 см) почв агро- и биогеоценозов равнинно-предгорных территорий Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии)

Местоположение почвы	Количество образцов	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Коэффициент вариации	Ошибка среднего
Агроценозы	138	2,18	1,13	3,81	22	0,04
Биогеоценозы	232	3,02	0,34	6,79	33	0,06

Выявлено, что все изученные почвы естественных биогеоценозов характеризуются содержанием  $C_{\text{орг}}$  (согласно принятой градации) от очень низких значений до высоких. Пахотные почвы обладают только низкими и средними величинами описываемого показателя. В результате сельскохозяйственного использования произошло статистически значимое ( $t = 9,58$ ;  $P < 0,000$ ) снижение содержания  $C_{\text{орг}}$  в пахотных горизонтах почв (в среднем на 28 %). По мнению исследователей данной проблемы, основной причиной снижения  $C_{\text{орг}}$  в пахотных почвах стало нарушение баланса между поступлением в почву органического вещества и его отторжением с урожаем, что приводит к увеличению скорости минерализации запасов  $C_{\text{орг}}$  почвы (Вальков и др., 2002; Орлов, Гришина, 1981).

Таблица 3. Внешние переменные, вносящие вклад в описание варьирования содержания  $C_{\text{орг}}$  в верхних горизонтах (0–20 см) почв агроценозов

Внешние переменные	Сводка регрессии для зависимой переменной $C_{\text{орг}}$ : $F(13,104) = 10,096$ ; $p < 0,00000$			
	$b$	Std. Err. of $b$	$t(104)$	$p$ -value
<i>Переменные Landsat</i>				
Снежный индекс	4,66	1,42	3,27	0,002
Отражённая солнечная энергия 1-го канала	-0,11	0,04	-2,62	0,01
Значение спектральной яркости 3-го канала	0,02	0,01	1,58	0,12
Индекс чистой продуктивности	0,000	0,000	2,75	0,01
<i>Переменные SRTM</i>				
Затемнённый рельеф для микроуровня	8,74	4,65	1,88	0,06
Максимальная кривизна для мезоуровня	6,89	2,36	2,92	0,004
Максимальная кривизна для микроуровня	-2,98	1,79	-1,66	0,10
Плановая выпуклость для микроуровня	0,29	0,16	1,86	0,07
Наклон поверхности для микроуровня	-0,17	0,06	-2,73	0,007
Лапласиан для микроуровня	0,01	0,001	3,88	0,000
Лапласиан для макроуровня	0,000	0,000	1,90	0,06
Лапласиан для мезоуровня	-0,000	0,000	-2,45	0,02
<i>Переменные WorldClim</i>				
Минимальная температура самого холодного месяца	-0,56	0,10	-5,41	0,00

Примечание: Landsat — данные о ландшафте, полученные со спутников серии Landsat; SRTM — информация о рельефе, рассчитанная на основе данных цифровой модели рельефа; Std. Err. — стандартный поток ошибок.

Анализ совокупности полученных данных показал, что естественные биогеоценозы и агроценозы представляют собой неидентичные системы, которые необходимо рассматривать отдельно друг от друга. Согласно результатам мультирегрессионного анализа, при описании варьирования содержания  $C_{орг}$  в почвах агроценозов из 167 рассмотренных внешних переменных наибольший вклад в формирование моделируемых значений данного параметра вносят 13 (табл. 3), большинство из которых относятся к характеристикам рельефа SRTM (8 переменных) и данным Landsat (4 переменные).

Таблица 4. Внешние переменные, вносящие вклад в описание варьирования содержания  $C_{орг}$  в верхних горизонтах (0–20 см) почв биогеоценозов

Внешние переменные	Сводка регрессии для зависимой переменной $C_{орг}$ : $F(31,170) = 3,7074; p < 0,00000$			
	<i>b</i>	Std. Err. of <i>b</i>	<i>t</i> (170)	<i>p</i> -value
<i>Переменные Landsat</i>				
Энтропия Кульбака	–25,94	10,77	–2,41	0,017
Индекс общей яркости	11,20	8,75	1,28	0,202
Коэффициент содержание оксидов железа	–1,89	1,76	–1,07	0,286
Отражённая солнечная энергия 1-го канала	0,05	0,06	0,83	0,409
Отражённая солнечная энергия 6-го канала	0,13	0,09	1,37	0,172
Поглощённая радиация	0,02	0,01	1,50	0,137
Значение спектральной яркости 7-го канала	0,01	0,004	2,04	0,043
Индекс влажности	0,00	0,00	0,47	0,640
Значение спектральной яркости 2-го канала	–0,00	0,001	–1,35	0,180
Значение спектральной яркости 1-го канала	0,00	0,001	1,25	0,212
<i>Переменные SRTM</i>				
Затемнённый рельеф для макроуровня	–115,89	34,92	–3,32	0,001
Профильная выпуклость для микроуровня	–88,66	34,15	–2,60	0,010
Затемнённый рельеф для мезоуровня	40,23	23,40	1,72	0,087
Выпуклость поперечного сечения для мезоуровня	–15,08	4,83	–3,12	0,002
Плановая выпуклость для мезоуровня	–5,68	1,64	–3,48	0,000
Выпуклость поперечного сечения для микроуровня	3,22	3,17	1,02	0,311
Плановая выпуклость для макроуровня	2,02	4,28	0,47	0,637
Наклон поверхности для макроуровня	–1,06	0,33	–3,26	0,001
Плановая выпуклость для микроуровня	0,25	0,18	1,38	0,171
Аспект для макроуровня	–0,003	0,001	–2,58	0,011
Аспект для мезоуровня	0,003	0,001	2,27	0,024
Лапласиан для макроуровня	0,00	0,00	2,42	0,017
Аспект для макроуровня	0,00	0,00	0,21	0,832
<i>Переменные WorldClim</i>				
Изотермальность	–3,53	1,75	–2,02	0,050
Средняя температура самого тёплого квартала	–2,45	0,73	–3,34	0,001
Средняя температура самого сухого квартала	1,35	0,52	2,60	0,010
Осадки самого засушливого месяца	0,40	0,23	1,75	0,083
Сезонность осадков	–0,39	0,13	–2,90	0,004
Осадки самого сухого квартала	–0,29	0,11	–2,80	0,006
Осадки самого влажного квартала	0,14	0,10	1,43	0,156
Осадки самого тёплого квартала	–0,06	0,12	–0,51	0,609

При рассмотрении естественных биогеоценозов мультирегрессионный анализ показал, что в описании варьирования содержания  $C_{орг}$  участвует 31 внешняя переменная (табл. 4), что существенно больше, чем в агроценозах. Вероятно, для описания естественных биогеоценозов, как более сложных систем, требуется большее количество внешних переменных. Причём в описание изменения рассматриваемого показателя в почвах биогеоценозов все три блока внешних данных (Landsat, WorldClim, SRTM) внесли примерно одинаковый вклад.

Исходя из того, что агроценозы и биогеоценозы относятся к двум различным системам и их невозможно моделировать вместе, были построены две картографические модели (рис. 2). Первая отражает пространственное варьирование значений содержания  $C_{орг}$  в верхнем горизонте (0–20 см) при гипотетическом использовании всей исследуемой территории под пашню (агроценозы), а вторая показывает, каким могло бы быть содержание  $C_{орг}$  в почвах исследуемых территорий в том случае, если бы на них не оказывалось сельскохозяйственное воздействие (биогеоценозы).

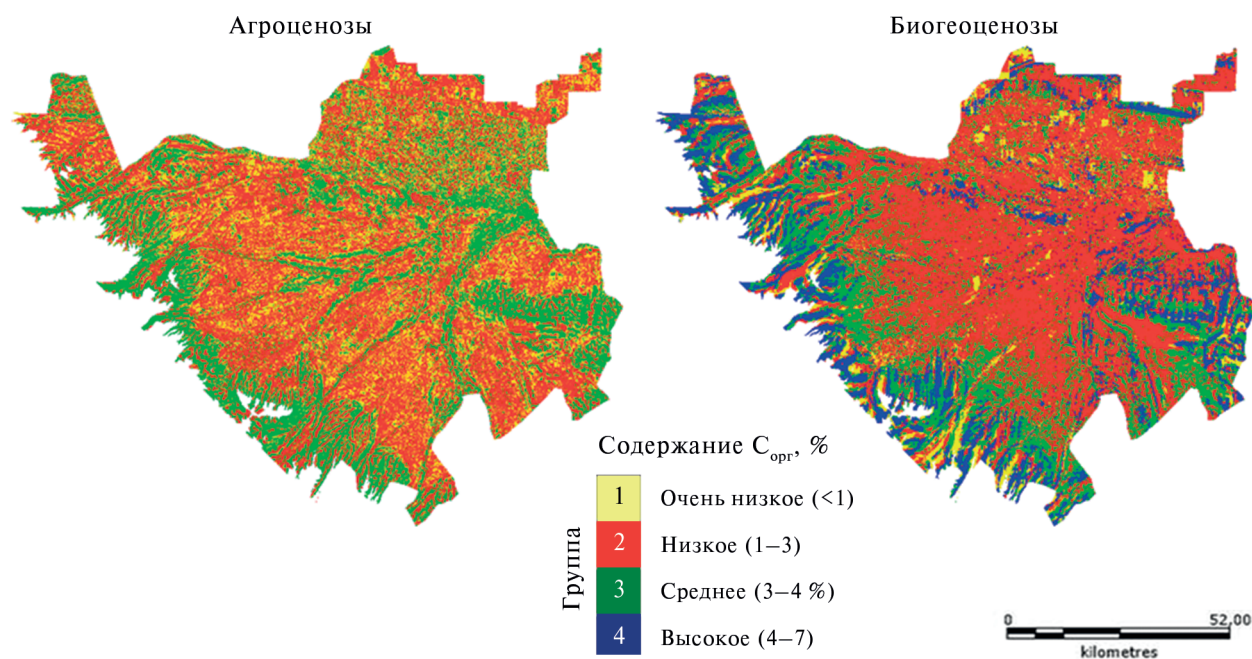


Рис. 2. Картографические модели, отражающие варьирование содержания  $C_{орг}$  (%) в условиях агроценозов и биогеоценозов

Полученные в результате дискриминантного анализа данные показывают (табл. 5), что представленные модели существенно различаются. В формировании модели, иллюстрирующей изменение показателя в почвах биогеоценозов, участвуют четыре группы почв с различным содержанием  $C_{орг}$ , а в модели агроценозов — всего две, так как в ней отсутствуют группы почв с очень низким и высоким содержанием  $C_{орг}$ . В естественных условиях почвы характеризуются более высоким разнообразием, которое снижается в пахотных почвах. Установлено, что свойства пахотных горизонтов при длительной обработке нивелируются и приобретают общие черты в строении, свойствах и ряде важнейших показателей, одним из которых выступает содержание  $C_{орг}$  (Романовская, 2006). Это, вероятно, объясняется тем, что среди пахотных почв, данные о которых вошли в обучающую выборку, не было образцов с очень низким и высоким содержанием  $C_{орг}$ , что и отразилось в модели. В работах различных авторов (Баева и др., 2017; Гедгафова и др., 2019; Хакунова и др., 2018) показано (а полученные нами модели наглядно отображают), как может измениться содержание  $C_{орг}$  в слое 0–20 см почв при их функционировании в условиях агроценозов по сравнению с естественными биогеоценозами. На модели, характеризующей почвы агроценозов, существенно увеличивается площадь почв с низким содержанием  $C_{орг}$  (на 96,5 тыс. га), что становится свидетельством снижения плодородия почв исследуемых территорий.

Завершающим этапом работы стала картографическая модель, отражающая реальную картину пространственного изменения содержания  $C_{орг}$  на всей исследуемой территории, для создания которой объединили описанные выше модели (агроценозы и биогеоценозы). Результатом работы стала представленная на *рис. 3* картографическая модель, отражающая пространственное изменение содержания  $C_{орг}$  в почвах исследуемых территорий в слое 0–20 см.

Таблица 5. Площади почв с определённым уровнем содержания  $C_{орг}$  (%) на составленных моделях

Группа	Содержание $C_{орг}$ (градация показателя, %)	Модель, характеризующая			
		агроценозы		биогеоценозы	
		Площадь, тыс. га	Доля от общей площади, %	Площадь, тыс. га	Доля от общей площади, %
1	Очень низкое (<1)	0		33,1	6,3
2	Низкое (1–3)	384,2	73	287,7	54,5
3	Среднее (3–4)	143,3	27	127,1	24,1
4	Высокое (4–7)	0		79,6	15,1

Примечание: разделение на группы согласно работе (Бирюкова, Бирюков, 2011).

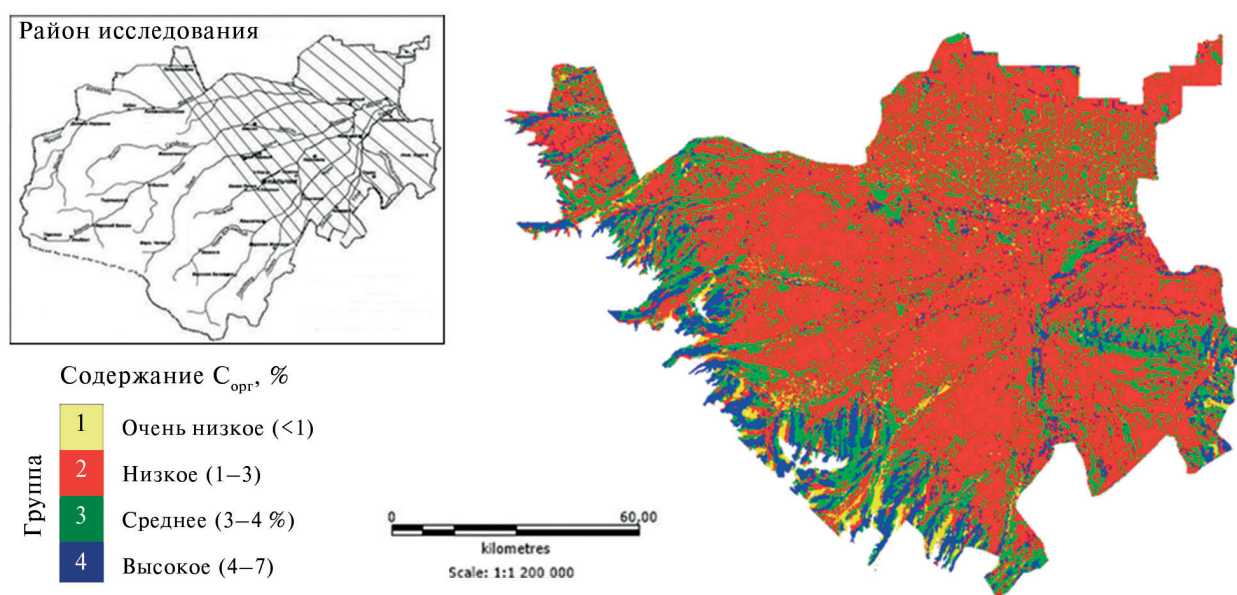


Рис. 3. Картографическая модель пространственного изменения содержания органического углерода (%) в слое (0–20 см) почв равнинно-предгорной части Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии)

Согласно полученной модели, содержание  $C_{орг}$  в верхних горизонтах почв (0–20 см) исследуемых территорий изменяется (в соответствии с используемой градацией) от очень низкого (<1 %) до высокого (4–7 %). Наибольшие площади занимают почвы с низким содержанием  $C_{орг}$  — 352,9 тыс. га (66,9 %), за которыми следуют почвы со средним содержанием — 112,3 тыс. га (21,3 %). Наименьшие территории занимают почвы с высоким (45,9 тыс. га, 8,7 %) и очень низким содержанием  $C_{орг}$ , площадь которых составляет всего 16,5 тыс. га, или 3,1 % от общей площади. Почвы с очень высоким содержанием (7–20 %) (согласно принятой шкале (Бирюкова, Бирюков, 2011)) на исследуемой территории отсутствуют. На представленной карте прослеживается увеличение содержания  $C_{орг}$  в предгорной части республики по сравнению с равнинной частью. Также на карте отражается повышенное содержание по-



казателя в прирусловой зоне рек Баксан, Чегем, Малка и на возвышенностях хребтов Дженап и Арик. Это, видимо, объясняется тем, что на указанных территориях из-за сложного рельефа или иных причин меньше распаханых земель, а содержание  $C_{орг}$  обычно выше в почвах естественных биогеоценозов.

Важнейшим этапом при создании картографических моделей представляется верификация, позволяющая установить их истинность и адекватность с помощью сопоставления модельных результатов с соответствующими фактическими данными. Проведённая верификация представленной картографической модели показала, что точность отображения содержания  $C_{орг}$  составляет 68 %. Это свидетельствует о том, что использованные методические подходы и применение данных лабораторно-полевых исследований в комплексе с дистанционной информацией позволяют построить не только достоверные картографические модели, которые могут отражать классификационные единицы и ареалы распространения почвенных разностей (Темботов и др., 2022), но и модели пространственного варьирования конкретных почвенных показателей, примером чего стала представленная карта.

## Заключение

В результате проведённой работы получен обширный фактический материал, на основе которого составлена картографическая модель, отражающая пространственное варьирование содержания  $C_{орг}$  (%) в верхнем горизонте (0–20 см) естественных и пахотных почв равнин и предгорий Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии). Мультифункциональный подход, при котором для создания моделей используются два блока данных (обучающая выборка и внешняя информация), позволил разработать качественно новый информационный продукт. В представленной модели пространственное варьирование изученного почвенного показателя ( $C_{орг}$ , %) отображается через комплекс данных, характеризующих отражательную способность земной поверхности, особенности климата и рельефа исследуемых территорий. Проведённая верификация подтверждает высокую достоверность представленной модели (68 %).

Важнейшим преимуществом разработанной картографической модели становится возможность её совершенствования посредством увеличения объёма обучающей выборки и повышения её достоверности. Информация, заключённая в модели, позволяет решать насущные научные и практические вопросы по хранению, систематизации и анализу комплекса данных о почвах, а также сходные задачи в районах с близкими природными условиями. Представленный информационный продукт представляется необходимым инструментом при проведении мониторинга процессов эмиссии и секвестирования углерода в почвах в условиях изменения климата и возрастающего антропогенного воздействия.

## Литература

1. Баева Ю. И., Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Телеснина В. М. Сравнительная оценка содержания углерода в постагрогенных почвах различных природно-климатических зон // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. № 2. С. 27–39. DOI: 10.21513/0207-2564-2017-2-27-39.
2. Бирюкова О. Н., Бирюков М. В. Содержание органического углерода в верхних горизонтах почв // Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель-АСТ, 2011. С. 230–231.
3. Вальков В. Ф., Колесников С. И., Казеев К. Ш. Почвы юга России: классификация и диагностика. Ростов н/Д: СКНЦ ВШ, 2002. 349 с.
4. Гедгафова Ф. В., Горобцова О. Н., Улигова Т. С., Темботов Р. Х., Хакунова Е. М. Оценка изменения биологической активности горных серых лесных почв Центрального Кавказа (терский вариант поясности в пределах Кабардино-Балкарии) в результате агроиспользования // Агрехимия. 2019. № 4. С. 23–30. DOI: 10.1134/S0002188119040069.
5. Гиниятуллин К. Г., Сахабиев И. А., Смирнова Е. В., Валева А. А., Рязанов С. С., Латыпова Л. И. Использование показателей отражательной способности как ковариаты содержания органического ве-

- щества в залежных почвах // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. Естественные науки. 2022. Т. 164. № 3. С. 438–456. DOI: 10.26907/2542-064X.2022.3.438-456.
6. Казеев К. Ш., Колесников С. И., Вальков В. Ф. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. Ростов н/Д: Изд-во Ростовского ун-та, 2003. 204 с.
  7. Карелин Д. В., Цымбарович П. Р. Зависимость микробиологической активности и химических характеристик почвы от топографической позиции на старопахотных участках черноземной лесостепи // Изв. Российской акад. наук. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 1. С. 134–150. <https://doi.org/10.31857/S2587556622010071>.
  8. Корзников К. А., Беляева Н. Г., Сандлерский Р. Б. Моделирование лесного покрова бассейна реки Венгери на острове Сахалин с применением данных дистанционного зондирования // Лесоведение. 2020. № 5. С. 399–411. DOI: 10.31857/S002411482005006X.
  9. Кренке А. Н. Отображение факторов формирования компонентов ландшафта на основе тематических карт, дистанционной информации и трехмерной модели рельефа: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2011. 129 с.
  10. Кренке А. Н., Пузаченко Ю. Г. Построение карты ландшафтного покрова на основе дистанционной информации // Экологическое планирование и управление. 2008. Т. 2. № 7. С. 10–25.
  11. Орлов Д. С., Гришина Л. А. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во МГУ, 1981. 272 с.
  12. Попов С. Ю. Опыт создания геоботанической карты методом дискриминантного анализа полевых и дистанционных данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 25–35. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-25-35.
  13. Пузаченко М. Ю., Черненко Т. В. Определение факторов пространственного варьирования растительного покрова с использованием ДДЗ, ЦМР и полевых данных на примере центральной части Мурманской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 167–191. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-167-191.
  14. Пузаченко Ю. Г., Онуфреня И. А., Алещенко Г. М. Спектральный анализ иерархической организации рельефа // Изв. Российской акад. наук. Сер. геогр. 2002. № 4. С. 29–38.
  15. Пузаченко М. Ю., Пузаченко Ю. Г., Козлов Д. Н., Федяева М. В. Картографирование мощности органического и гумусового горизонтов лесных почв и болот южно-таежного ландшафта (юго-запад Валдайской возвышенности) на основе трехмерной модели рельефа и дистанционной информации (Landsat-7) // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 4. С. 70–78.
  16. Романовская А. А. Органический углерод в почвах залежных земель России // Почвоведение. 2006. № 1. С. 52–61.
  17. Савин И. Ю. Использование спутниковых данных для составления почвенных карт: современные тенденции и проблемы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 29–39. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-29-39.
  18. Савин И. Ю. Перспективы развития картографирования и мониторинга почв на основе интерполяции точечных данных и дистанционных методов // Вестн. Московского ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2022. № 2. С. 13–19.
  19. Сандлерский Р. Б., Пузаченко Ю. Г. Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // Журн. общей биологии. 2009. Т. 70. № 2. С. 121–142.
  20. Темботов Р. Х., Горобцова О. Н., Гедгафова Ф. В., Улигова Т. С., Хакунова Е. М. Применение дистанционной информации и ГИС-технологий для создания цифровых почвенных карт (на примере равнинно-предгорной части Кабардино-Балкарии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 128–137. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-128-137.
  21. Хакунова Е. М., Горобцова О. Н., Гедгафова Ф. В., Улигова Т. С., Темботов Р. Х. Изменение биологической активности горных черноземов Центрального Кавказа при сельскохозяйственном использовании (в границах эльбрусского варианта поясности Кабардино-Балкарии) // Агрохимия. 2018. № 3. С. 12–18. DOI: 10.7868/S000218811803002X.
  22. Чинилин А. В., Савин И. Ю. Оценка содержания органического углерода в почвах России с помощью ансамблевого машинного обучения // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5: География. 2022. № 6. С. 49–63. DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-49-63.
  23. Щепаченко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132. DOI: 10.7868/S0032180X13020123.
  24. Abakutov E. V., Polyakov V. I., Orlova K. S. Podzol development on different aged coastal bars of Lake Ladoga // Вестн. Томского гос ун-та. Биология. 2019. Т. 48. С. 6–31. DOI: 10.17223/19988591/48/1.
  25. Angelopoulou T., Tziolas N., Balafoutis A., Zalidis G., Bochtis D. Remote sensing techniques for soil organic carbon estimation: A review // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 6. Art. No. 676. DOI: 10.3390/rs11060676.
  26. Bhunia G. S., Shit P. K., Pourghasemi H. R. Soil organic carbon mapping using remote sensing techniques and multivariate regression model // Geocarto Intern. 2019. V. 34. No. 2. P. 215–226. DOI: 10.1080/10106049.2017.1381179.

27. *Castaldi F., Chabrilat S., Chartin C., Genot V., Jones A., van Wesemael B.* Estimation of soil organic carbon in arable soil in Belgium and Luxembourg with the LUCAS topsoil database // *European J. Soil Science*. 2018. V. 69. No. 4. P. 592–603. DOI: 10.1111/ejss.12553.
28. *Dou X., Wang X., Liu H., Zhang X., Meng L., Pan Y., Yu Z., Cui Y.* Prediction of soil organic matter using multi-temporal satellite images in the Songnen Plain, China // *Geoderma*. 2019. V. 356. Art. No. 113896. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113896.
29. *Elbeih S. F.* Evaluation of agricultural expansion areas in the Egyptian deserts: A review using remote sensing and GIS // *The Egyptian J. Remote Sensing and Space Science*. 2021. V. 24. No. 2. P. 889–906. DOI: 10.1016/j.ejrs.2021.10.004.
30. *Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Version 1.5: Technical Report.* FAO and ITPS. Rome, Italy: FAO, 2020. 169 p. DOI: 10.4060/ca7597en.
31. *Gomes L. C., Faria R. M., de Souza E., Veloso G. V., Schaefer C. E. G. R., Filho E. I. F.* Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil // *Geoderma*. 2019. V. 340. P. 337–350. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.01.007.
32. *Jobbágy E. G., Jackson R. B.* The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // *Ecological Applications*. 2000. V. 10. No. 2. P. 423–436. DOI: 10.2307/2641104.
33. *Karger D. N., Conrad O., Böhrner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R. W., Zimmermann N. E., Linder P., Kessler M.* Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas // *Scientific Data*. 2017. Art. No. 170122. DOI: 10.1038/sdata.2017.122.
34. *Knoblauch C., Beer C., Sosnin A., Wagner D., Pfeiffer E. M.* Predicting long-term carbon mineralization and trace gas production from thawing permafrost of Northeast Siberia // *Global Change Biology*. 2013. V. 19. Iss. 4. P. 1160–1172. <https://doi.org/10.1111/gcb.12116>.
35. *Lefèvre C., Rekik F., Alcantara V., Wiese L.* Soil organic carbon: the hidden potential / *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. Rome, Italy, 2017. 90 p.
36. *Liang Z., Chen S., Yang Y., Zhou Y., Shi Z.* High-resolution three-dimensional mapping of soil organic carbon in China: Effects of SoilGrids products on national modeling // *Science of Total Environment*. 2019. V. 685. P. 480–489. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.332.
37. *Ma Y., Minasny B., Viaud V., Walter C., Malone B., McBratney A.* Modelling the Whole Profile Soil Organic Carbon Dynamics Considering Soil Redistribution under Future Climate Change and Landscape Projections over the Lower Hunter Valley, Australia // *Land*. 2023. V. 12(1). Art. No. 255. DOI: 10.3390/land12010255.
38. *Minasny B., McBratney A. B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // *Geoderma*. 2016. V. 264. Pt. B. P. 301–311. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.07.017.
39. *Minasny B., Malone B. P., McBratney A. B. et al.* Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. 2017. V. 292. P. 59–86. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002.
40. *Recarbonization of global soils — A tool to support the implementation of the Koronivia Joint Work on Agriculture.* 2020. 12 p. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca6522en/> (accessed 27.04.2023).
41. *Rozhkov V. A., Wagner V. B., Kogut B. M., Konyushkov D. E., Nilsson S., Sheremet V. B., Shvidenko A. Z.* Soil Carbon Estimates and Soil Carbon Map for Russia: IIASA Working Paper. 1996. No. WP-96-060. 47 p.
42. *Showstack R.* Agricultural sequestration called useful stop-gap mitigation measure for reducing atmospheric carbon // *Eos Trans. American Geophysical Union*. 2003. V. 84. No. 29. P. 269–277. DOI: 10.1029/2003EO290003.
43. *Stolbovoi V.* Carbon in Russian soils // *Climatic Change*. 2002. V. 55(1). P. 131–156. DOI: 10.1023/A:1020289403835.
44. *Suleymanov A., Gabbasova I., Suleymanov R., Abakumov E., Polyakov V., Liebelt P.* Mapping soil organic carbon under erosion processes using remote sensing // *Hungarian Geographical Bull.* 2021. P. 49–64. DOI: 10.15201/hungeobull.70.1.4.
45. *Szatmári G., Pásztor L., Heuvelink G. B. M.* Estimating soil organic carbon stock change at multiple scales using machine learning and multivariate geostatistics // *Geoderma*. 2021. V. 403. Art. No. 115356. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115356.
46. *Yang L., Meng X., Zhang X.* SRTM DEM and its application advances // *Intern. J. Remote Sensing*. 2011. V. 32. No. 14. P. 3875–3896. DOI: 10.1080/01431161003786016.
47. *Zhou T., Geng Y., Ji C., Xu X., Wang H., Pan J., Bumberger J., Haase D., Lausch A.* Prediction of soil organic carbon and the C:N ratio on a national scale using machine learning and satellite data: A comparison between Sentinel-2, Sentinel-3 and Landsat-8 images // *Science of Total Environment*. 2021. V. 755. Art. No. 142661. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142661.

## Using a multifunctional approach for cartographic modeling of organic carbon content in natural and arable soils of Central Caucasus

R. Kh. Tembotov

*Tembotov Institute of Ecology of Mountain Territories RAS, Nalchik 360051, Russia*  
*E-mail: tembotov.rustam@mail.ru*

Based on the information obtained on organic carbon content in soils and remote sensing data, a mapping model reflecting the spatial variation of organic carbon content in the upper horizons (0–20 cm) of soils in Central Caucasus was created using digital soil modelling and mapping technology. For modelling we applied a multifunctional approach involving a combination of actual data on the organic carbon content (training set) with data derived from external sources of information (remote sensing data) that was processed using a stepwise discriminant analysis. The necessity to create a model of organic carbon distribution in soils separately for artificial (agrocenoses) and natural biogeocenoses was established using statistical methods of analysis. As a result of combining two hypothetical models, a verified model reflecting the real picture of changes in the organic carbon content in soils of Central Caucasus was obtained. Reliability of the model was 68 %. It contains actual data on organic carbon content in natural and agrogenic soils of Central Caucasus. This model is a necessary tool for decision making to maintain or increase current soil carbon stocks under conditions of climate change and increasing anthropogenic impact.

**Keywords:** organic carbon content, cartographic models, discriminant analysis, Landsat, SRTM, WorldClim

Accepted: 20.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-193-206

### References

1. Baeva Yu. I., Kurganova I. N., Lopez de Gerenyu V. O., Telesnina V. M., Comparative assessment of carbon content in postagrogenic soils of various natural climatic zone, *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2017, No. 2, pp. 27–39 (in Russian), DOI: 10.21513/0207-2564-2017-2-27-39.
2. Biryukova O. N., Biryukov M. V., Organic carbon content in the upper horizons of soils, *Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* (National Atlas of Soils of the Russian Federation), Moscow: Astrel'-AST, 2011, pp. 230–231 (in Russian).
3. Val'kov V. F., Kolesnikov S. I., Kazeev K. Sh., *Pochvy yuga Rossii: klassifikatsiya i diagnostika* (Soils of the South of Russia: Classification and diagnostics), Rostov-on-Don: HSE Research Center, 2002, 349 p. (in Russian).
4. Gedgafova F. V., Gorobtsova O. N., Uligova T. S., Tembotov R. Kh., Khakunova E. M., Changes in biological activity of mountain gray forest soils of the Central Caucasus (terskiy variant of vertical zonation within Kabardino-Balkaria) resulting from agricultural use, *Agrokhimiya*, 2019, No. 4, pp. 23–30 (in Russian), DOI: 10.1134/S0002188119040069.
5. Giniyatullin K. G., Sakhabiev I. A., Smirnova E. V., Valeeva A. A., Ryazanov S. S., Latypova L. I., Using the reflectance parameters as covariates of the organic matter content in fallow soils, *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki*, 2022, Vol. 164, No. 3, pp. 438–456 (in Russian), DOI: 10.26907/2542-064X.2022.3.438-456.
6. Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I., Val'kov V. F., *Biologicheskaya diagnostika i indikatsiya pochv: metodologiya i metody issledovaniya* (Biological diagnostics and indication of soils: methodology and research methods), Rostov-on-Don: Publ. House of the Rostov University, 2003, 204 p. (in Russian).
7. Karelin D. V., Tsymbarovich P. R., Soil microbial activity and chemical properties in relation to the topographic position of chernozem arable lands, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, Vol. 86, No. 1, pp. 134–150 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622010071.
8. Korznikov K. A., Belyaeva N. G., Sandler'skiy R. B., Modeling of the forest cover of the Vengeri River basin on Sakhalin Island using remote sensing data, *Lesovedenie*, 2020, No. 5, pp. 399–411 (in Russian), DOI: 10.31857/S002411482005006X.
9. Krenke A. N., *Otobrazhenie faktorov formirovaniya komponentov landshafta na osnove tematicheskikh kart, distantsionnoi informatsii i trekhmernoj modeli rel'efa: Diss. kand. geogr. nauk* (Mapping factors of the forma-

- tion of landscape components based on thematic maps, remote information and a three-dimensional relief model, Cand. geogr. sci. thesis), Moscow, 2011, 129 p. (in Russian).
10. Krenke A. N., Puzachenko Yu. G., Building a landscape cover map based on remote information, *Ekologicheskoe planirovanie i upravlenie*, 2008, Vol. 2, No. 7, pp. 10–25 (in Russian).
  11. Orlov D. S., Grishina L. A., *Praktikum po khimii gumusa* (Workshop on chemistry of humus), Moscow: MSU Publ. House, 1981, 272 p.
  12. Popov S. Yu., Experience of creating a geobotanical map using discriminant analysis of field vegetation description and remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 25–35 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-25-35.
  13. Puzachenko M. Yu., Chernenkova T. V., Definition of factors of spatial variation in vegetation using RSD, DEM and field data by example of the central part of Murmansk Region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 5, pp. 167–191 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-167-191.
  14. Puzachenko Yu. G., Onufrenya I. A., Aleshchenko G. M., Spectral analysis of the hierarchical organization of relief, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2002, No. 4, pp. 29–38 (in Russian).
  15. Puzachenko M. Yu., Puzachenko Yu. G., Kozlov D. N., Fedyaeva M. V., Mapping the power of organogenic and humus horizons of forest soils and swamps of the South Taiga landscape (southwest of the Valdai upland) based on a three-dimensional relief model and remote information (Landsat-7), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 4, pp. 70–78 (in Russian).
  16. Romanovskaya A. A., Organicheskiy uglevod v pochvakh zaleznykh zemel' Rossii (Organic carbon in soils of fallow lands in Russia), *Pochvovedenie*, 2006, No. 1, pp. 52–61 (in Russian).
  17. Savin I. Yu., Usage of satellite data for soil mapping: modern tendencies and problems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 29–39 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-29-39.
  18. Savin I. Yu., The trends of soil mapping and monitoring based on interpolation of point data and remote sensing methods, *Moscow University Soil Science Bull.*, 2022, Vol. 77, No. 2, pp. 62–66.
  19. Sandlerskiy R. B., Puzachenko Yu. G., Biogeocenosis thermodynamics based on remote sensing, *Zhurnal obshchei biologii*, 2009, Vol. 70, No. 2, pp. 121–142 (in Russian).
  20. Tembotov R. Kh., Gorobtsova O. N., Gedgafova F. V., Uligova T. S., Khakunova E. M., Application of remote information and GIS technologies to create digital soil map (by the example of the plain and foothill parts of Kabardino-Balkaria), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 128–137 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-128-137.
  21. Khakunova E. M., Gorobtsova O. N., Gedgafova F. V., Uligova T. S., Tembotov R. Kh., Change in biological activity of Central Caucasus mountain chernozems under agricultural use (within the boundaries of the elbrus vertical zonation pattern in Kabardino-Balkaria), *Agrokhimiya*, 2018, No. 3, pp. 12–18 (in Russian), DOI: 10.7868/S000218811803002X.
  22. Chinilin A. V., Savin I. Yu., Estimation of organic carbon content in Russian soils using ensemble machine learning, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*, 2022, No. 6, pp. 49–63 (in Russian), DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-49-63.
  23. Schepaschenko D. G., Mukhortova L. V., Shvidenko A. Z., Vedrova E. F., The Pool of Organic Carbon in the Soils of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 2, pp. 107–116, DOI: 10.1134/S1064229313020129.
  24. Abakumov E. V., Polyakov V., Orlova K. S., Podzol development on different aged coastal bars of Lake Ladoga, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo univversiteta, Biologiya*, 2019, Vol. 48, pp. 6–31, DOI: 10.17223/19988591/48/1.
  25. Angelopoulou T., Tziolas N., Balafoutis A., Zalidis G., Bochtis D., Remote sensing techniques for soil organic carbon estimation: A review, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 6, Art. No. 676, DOI: 10.3390/rs11060676.
  26. Bhunia G. S., Shit P. K., Pourghasemi H. R., Soil organic carbon mapping using remote sensing techniques and multivariate regression model, *Geocarto Intern.*, 2019, Vol. 34, No. 2, pp. 215–226, DOI: 10.1080/10106049.2017.1381179.
  27. Castaldi F., Chabrilat S., Chartin C., Genot V., Jones A. R., van Wesemael B., Estimation of soil organic carbon in arable soil in Belgium and Luxembourg with the LUCAS topsoil database, *European J. Soil Science*, 2018, Vol. 69, No. 4, pp. 592–603, DOI: 10.1111/ejss.12553.
  28. Dou X., Wang X., Liu H., Zhang X., Meng L., Pan Y., Yu Z., Cui Y., Prediction of soil organic matter using multi-temporal satellite images in the Songnen Plain, China, *Geoderma*, 2019, Vol. 356, No. 113896, DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113896.
  29. Elbeih S. F., Evaluation of agricultural expansion areas in the Egyptian deserts: A review using remote sensing and GIS, *The Egyptian J. Remote Sensing and Space Science*, 2021, Vol. 24, Issue 3, No. 2, pp. 889–906, DOI: 10.1016/j.ejrs.2021.10.004.

30. *Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Version 1.5: Technical Report*, FAO and ITPS, Rome, Italy: FAO, 2020, 169 p., DOI: 10.4060/ca7597en.
31. Gomes L. C., Faria R. M., de Souza E., Veloso G. V., Schaefer C. E. G. R., Filho E. I. F., Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil, *Geoderma*, 2019, Vol. 340, pp. 337–350, DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.01.007.
32. Jobbágy E. G., Jackson R. B., The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation, *Ecological Applications*, 2000, Vol. 10, No. 2, pp. 423–436, DOI: 10.2307/2641104.
33. Karger D. N., Conrad O., Böhrer J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R. W., Zimmermann N. E., Linder P., Kessler M., Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas, *Scientific Data*, 2017, Art. No. 170122, DOI: 10.1038/sdata.2017.122.
34. Knoblauch C., Beer C., Sosnin A., Wagner D., Pfeiffer E. M., Predicting long-term carbon mineralization and trace gas production from thawing permafrost of Northeast Siberia, *Global Change Biology*, 2013, Vol. 19, Issue 4, pp. 1160–1172, <https://doi.org/10.1111/gcb.12116>.
35. Lefèvre C., Rekik F., Alcantara V., Wiese L., *Soil organic carbon: the hidden potential*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 2017, 90 p.
36. Liang Z., Chen S., Yang Y., Zhou Y., Shi Z., High-resolution three-dimensional mapping of soil organic carbon in China: Effects of SoilGrids products on national modeling, *Science of Total Environment*, 2019, Vol. 685, pp. 480–489, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.332.
37. Ma Y., Minasny B., Viaud V., Walter C., Malone B., McBratney A., Modelling the Whole Profile Soil Organic Carbon Dynamics Considering Soil Redistribution under Future Climate Change and Landscape Projections over the Lower Hunter Valley, Australia, *Land*, 2023, Vol. 12(1), Art. No. 255, DOI: 10.3390/land12010255.
38. Minasny B., McBratney A. B., Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, Pt. B, pp. 301–311, DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.07.017.
39. Minasny B., Malone B. P., McBratney A. B. et al., Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 2017, Vol. 292, pp. 59–86, DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002.
40. *Recarbonization of global soils — A tool to support the implementation of the Koronivia Joint Work on Agriculture*, 2020, 12 p., <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca6522en/> (accessed 27.04.2023).
41. Rozhkov V. A., Wagner V. B., Kogut B. M., Konyushkov D. E., Nilsson S., Sheremet V. B., Shvidenko A. Z., Soil Carbon Estimates and Soil Carbon Map for Russia: IASA Working Paper, 1996, No. WP-96-060. 47 p.
42. Showstack R., Agricultural sequestration called useful stop-gap mitigation measure for reducing atmospheric carbon, *Eos Trans. American Geophysical Union*, 2003, Vol. 84, No. 29, pp. 269–277, DOI: 10.1029/2003EO290003.
43. Stolbovoi V., Carbon in Russian soils, *Climatic Change*. 2002, Vol. 55(1), pp. 131–156, DOI: 10.1023/A:1020289403835.
44. Suleymanov A., Gabbasova I., Suleymanov R., Abakumov E., Polyakov V., Liebelt P., Mapping soil organic carbon under erosion processes using remote sensing, *Hungarian Geographical Bull.*, 2021, No. 1, pp. 49–64, DOI: 10.15201/hungeobull.70.1.4.
45. Szatmári G., Pásztor L., Heuvelink G. B. M., Estimating soil organic carbon stock change at multiple scales using machine learning and multivariate geostatistics, *Geoderma*, 2021, Vol. 403, Art. No. 115356, DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115356.
46. Yang L., Meng X., Zhang X., SRTM DEM and its application advances, *Intern. J. Remote Sensing*, 2011, Vol. 32, No. 14, pp. 3875–3896, DOI: 10.1080/01431161003786016.
47. Zhou T., Geng Y., Ji C., Xu X., Wang H., Pan J., Bumberger J., Haase D., Lausch A., Prediction of soil organic carbon and the C:N ratio on a national scale using machine learning and satellite data: A comparison between Sentinel-2, Sentinel-3 and Landsat-8 images, *Science of Total Environment*, 2021, Vol. 755, Art. No. 142661, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142661.