

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОНИРОВАНИЯ ЗАЛЕЖНОЙ
РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ВЕГЕТАЦИОННЫМ ИНДЕКСАМ
ДЛЯ ОЦЕНКИ НАКОПЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА
В ПОСТАГРОГЕННЫХ ПОЧВАХ

© 2023 г. К. Г. Гиниятуллин^а, * (ORCID: 0000–0003–4102–2209), И. А. Сахабиев^а,
С. С. Рязанов^б, Е. В. Смирнова^а, Д. В. Тишин^а, Л. И. Латыпова^а

^аКазанский федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008 Россия

^бИнститут проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан,
ул. Даурская, 28, Казань, 420087 Россия

*e-mail: ginijatullin@mail.ru

Поступила в редакцию 07.02.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 11.04.2023 г.

Исследовали массив светло-серой лесной почвы (Eutric Retisols (Loamic, Cutanic, Ochric)), находящейся под залежью возрастом 20–25 лет в стадии зарастания луговой растительностью, сосной и березой. Участок приурочен к одному элементу рельефа, не имеет морфологических признаков развития эрозионных процессов и характеризуется однородным гранулометрическим составом. Для оценки влияния типа залежной растительности на формирование запасов почвенного органического вещества (ПОВ) было проведено зонирование растительного покрова по вегетационным индексам, рассчитанным на основе данных дистанционного зондирования Земли. Для зонирования использовали алгоритмы *k*-средних и метод “случайного леса”. Показано наличие статистически значимых различий между типами земного покрова по запасам ПОВ в верхнем слое старопашотного горизонта при выделении 3 и 4 кластеров. Показано, что наиболее целесообразным является выделение при использовании алгоритма *k*-средних 3 классов залежной растительности: хвойная древесная растительность, лиственная древесная растительность и травянистая растительность. Корректность выделения данных классов была подтверждена полевым геоботаническим обследованием территории. Результаты попарного сравнения участков, занятых различными типами залежной растительности, показывают наличие значимых различий по запасам ПОВ только в самом верхнем слое (0–5 см) старопашотного горизонта и только при сравнении с массивом, занятым древесной хвойной растительностью и травянистой растительностью. Различия по накопленным запасам гумуса в верхнем слое (0–10 см) старопашотного горизонта статистически значимо проявляются в почвах под лиственной и хвойной древесной растительностью, а также между травянистой и хвойной растительностью. Значимой разницы по данному показателю между участками, занятыми древесной лиственной растительностью и травянистой растительностью, не наблюдалось.

Ключевые слова: залежные почвы, почвенное органическое вещество, пространственное моделирование, Eutric Retisols (Loamic, Cutanic, Ochric)

DOI: 10.31857/S0032180X2360018X, EDN: OIWJW

ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество почв рассматривается как один из наиболее существенных потенциальных резервуаров секвестрации углекислого газа, и в то же время деградация почвенного покрова является одной из основных причин его поступления в атмосферу [7, 9, 29]. Считается, что исторически почвенный покров мира уже потерял от 40 до 90 Пг С из-за нерационального сельскохозяйственного использования, а текущие темпы потерь почвенного органического углерода в результате

изменений в землепользовании и деградации земель составляют примерно 1.6 ± 0.8 Пг/год [32]. Реалистичная оценка запасов почвенного органического вещества (ПОВ) и постоянный мониторинг гумусного состояния почв, является, безусловно, важнейшей задачей современного почвоведения. Вместе с тем необходимо учитывать, что расчет средних значений при недостаточном объеме выборочных данных является основным источником ошибок региональных оценок запасов ПОВ [28, 55], в особенности при использовании данных, имеющих точечную локализацию в

пространстве. Как следствие, картографирование почвенного покрова при различных уровнях масштабирования является часто безальтернативным подходом, обеспечивающим получение реалистичных оценок запасов ПОВ [27]. Однако простое увеличение количества точек отбора почвенных проб для создания более надежных карт пространственной изменчивости содержания ПОВ имеет существенные трудности, связанные с увеличением затрат на отбор проб и проведением анализов [37]. В последние десятилетия для построения надежных карт пространственного прогноза изменения почвенных свойств, включая содержание ПОВ, широко используются методы цифрового картографирования, которые позволяют без дополнительных затрат получать точные пространственные модели изменения содержания ПОВ [26]. Привлекательность методов цифрового картографирования для создания карт содержания ПОВ во многом определяется доступностью данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [33, 52], в том числе из открытых источников. Пространственные модели содержания ПОВ в различных слоях и горизонтах почв могут с достаточной точностью создаваться на различных уровнях масштабирования: глобальном [53, 56], национальном [47, 57], региональном [36, 46, 54], а также для отдельно взятых массивов и полей севооборотов [3, 40, 48]. Понимание важности картографирования содержания ПОВ связывается с масштабными работами по созданию Всемирной карты запасов органического углерода в 30-сантиметровом слое почвы (в рамках Глобального почвенного партнерства ФАО ООН (GSOС17)). Данная карта должна стать основой для разработки стратегии устойчивого развития регионов и прогноза влияния климатических изменений на баланс углерода [7, 27, 29, 30].

Отдельной проблемой, связанной с оценкой запасов ПОВ, является необходимость реалистичной оценки масштабов его накопления на территории России за последние десятилетия под залежными почвами. По данным Кургановой [11], площадь пахотных угодий, выведенных из сельскохозяйственного оборота в 1990–2004 гг., в России может составлять от 9.3 до 34 млн га. Романовская [18] считает, что с 1990 по 2002 гг. было выведено из оборота 21.6 млн га земель. По другим оценкам [13] площадь заброшенных сельскохозяйственных угодий может достигать 44.4 млн га, что составляет в целом по стране 22.1% от исходной площади сельскохозяйственных угодий, хотя в некоторых регионах наблюдается в настоящее время и обратный тренд [15]. Примерно такого же порядка цифры (около 40 млн га) приводятся в других работах [5, 44]. С учетом того, что скорость аккумуляции ПОВ в бывшем пахотном слое может составлять в среднем 90–100 г С/м² год [11], вклад залежей в секвестрацию углекислого газа

атмосферы должен оцениваться как весьма существенный [8]. Вместе с тем методические подходы к картографированию содержания ПОВ в залежных почвах с учетом пространственной неоднородности его накопления в достаточной степени не отработаны [2].

При картографировании пахотных угодий в качестве основных предикторов содержания ПОВ используются спектральные индексы, рассчитываемые по отражательной способности открытой поверхности почвы, которые могут использоваться как самостоятельные переменные, так и совместно с другими данными ДЗЗ (вегетационными индексами растительности, морфометрическими атрибутами рельефа и др.). Применение спектральных индексов дает надежный пространственный прогноз при использовании различных методов моделирования, от регрессионного кригинга до сложных гибридных методов (машинное обучение, глубокое обучение, нейронные сети и др.) [36, 38, 40, 48, 51]. При цифровом картографировании залежных почв и оценке их современного состояния данные ДЗЗ ограничиваются показателями, характеризующими состояние растительности и геоморфологию исследуемой территории, поскольку получение спектральных индексов отражения открытой поверхности почвы под развитой залежной растительностью часто невозможно. Как следствие, цифровое картографирование залежных участков в масштабах одного отдельно взятого поля или массива является существенно более сложной задачей, чем картографирование аналогичных пахотных земель из-за ограниченности доступных предикторов. Вместе с тем необходимость изучения пространственной неоднородности и детального картографирования постагрогенных земель принимается как обязательное условие их дальнейшего изучения и оценки роли в сохранении углеродного баланса [22–24].

Цель работы – оценить возможность зонирования залежной растительности по вегетационным индексам в пределах небольшого массива постагрогенных почв и использования вегетационных индексов как предикторов накопления ПОВ под залежами.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования выбрали участок постагрогенных почв площадью 10.2 га, находящийся под залежной растительностью возрастом 20–25 лет. Почвенный покров исследованного участка принадлежит к одной почвенной разновидности – светло-серая лесная почва (серая постагрогенная (по [6])). Участок постагрогенной почвы прошел начальные стадии зарастания сорной и луговой растительностью и в настоящее время находится в стадии внедрения в луговой

фитоценоз древесных пород и формирования древесного фитоценоза [13]. Поскольку участок примыкает одновременно к опушке широколиственного леса, сосновой лесополосе и более молодым залежным участкам, то зарастание лугового травянистого ценоза древесными породами по периферии и в центральной части участка шло неравномерно. В настоящее время на участке одновременно с травянистыми залежными сообществами присутствуют древесные сообщества, представленные мелколиственными и хвойными породами.

Участок приурочен к одному элементу рельефа – слабопологому склону юго-восточной экспозиции. Отбор образцов почв проводили по специальной стратифицированной рандомизованной схеме, предложенной в работе [58] и ориентированной на использование геостатистических методов пространственной интерполяции. На участке было заложено 50 страт одинакового размера, но произвольной формы, внутри которых рандомизованно размещалась по одной точке пробоотбора. Координаты точек регистрировали на местности с помощью полевого GPS-контроллера Trimble Juno 5D (США) с точностью геопозиционирования 1 м. Из верхнего слоя (0–15 см) старопахотного горизонта образцы отбирали через каждые 5 см, ниже 15 см – на всю оставшуюся мощность, которую фиксировали как величину *b*. В образцах определяли содержание ПОВ и плотность сложения почвенного материала. Расчет общих (на всю мощность старопахотного горизонта) и накопленных (в слоях 0–10 и 0–15 см) запасов ПОВ проводили по методике, описанной в работе [2]. Для создания карт запасов ПОВ для каждого слоя старопахотного горизонта с применением различных методов интерполяции (ординарного кригинга и обратных взвешенных расстояний) создавали по 3 интерполированные карты – содержания ПОВ, плотности сложения почвы и мощности горизонта. Карты создавали с одинаковым количеством интерполированных точек, затем для каждой интерполированной точки рассчитывали общий запас ПОВ в старопахотном горизонте. Накопленные запасы ПОВ в слоях 0–10 и 0–15 см рассчитывали ориентировочно по разнице в содержании ПОВ в верхней и нижней части старопахотного горизонта. Анализ созданных карт показал, что 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 (47.5 т/га). В отдельной выборке образцов определяли гранулометрический состав материала старопахотного горизонта.

Для изучения влияния типов залежного растительного покрова на вариабельность почвенных свойств был подобран мультиспектральный спутниковый снимок Landsat 8 с максимальным веге-

тационным покрытием и отсутствием облачности. Цифровые значения яркости снимков конвертировали в значения отражения на поверхности атмосферы с последующей атмосферной коррекцией по методу DOS1 [34, 45]. Поскольку исходный снимок имеет довольно грубое пространственное разрешение (30 × 30 м), была проведена процедура паншарпенинга (pan-sharpening), которая позволила увеличить пространственное разрешение до 15 × 15 м.

Для идентификации типов растительного покрова по данным ДЗЗ были использованы два метода кластеризации данных: алгоритм многомерных исследовательских методов *k*-средних (*k*-means) и алгоритм машинного обучения методом “случайного леса” (Random Forest) [31]. Для кластеризации были использованы спектральные каналы отражательной способности поверхности Земли (Канал 2–Канал 7) спутника Landsat 8, а также рассчитанные на их основе вегетационные индексы (1)–(5), наиболее широко применяемые для характеристики степени развития и состояния растительного покрова.

$$NDVI = \frac{\text{Канал 5} - \text{Канал 4}}{\text{Канал 5} + \text{Канал 4}}, \quad (1)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{\text{Канал 5} - \text{Канал 4}}{\text{Канал 5} + 6 \times \text{Канал 4} - 7.5 \times \text{Канал 2} + 1}, \quad (2)$$

$$GLI = \frac{(\text{Канал 3} - \text{Канал 4}) + (\text{Канал 3} - \text{Канал 2})}{2 \times \text{Канал 3} + \text{Канал 4} + \text{Канал 2}}, \quad (3)$$

$$GOSAVI = \frac{\text{Канал 5} - \text{Канал 3}}{\text{Канал 5} + \text{Канал 3} + 0.16}, \quad (4)$$

$$LAI = 3.618EVI - 0.118. \quad (5)$$

Оценка разницы в содержании ПОВ на участках с различными типами растительного покрова была проведена с применением однофакторного дисперсионного анализа на основе генерализованных линейных моделей GLS (generalized least squares). Точкам обследования присваивался тип залежной растительности согласно картам, полученным разными методами кластеризации. Сравнение моделей без пространственной автокорреляции (GLS) и с пространственной структурой (GLS + Sp) проводилось на основе информационного критерия Акайке (AIC). Модель с наименьшим значением AIC применялась для попарного сравнения содержания ПОВ в почвах под различными типами растительности методом Тьюки. Предварительная обработка снимков Landsat и финальная компоновка карт проводились с использованием геоинформационной системы QGIS [49] и модуля Semi-Automatic classifi-

Таблица 1. Статистические показатели содержания фракций гранулометрического состава

Параметр	Содержание фракции (мм), %							
	1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	>0.01	<0.01
Минимум	2.6	38.9	27.6	4.2	3.9	12.5	75.0	21.4
Максимум	6.2	44.8	35.3	5.6	5.3	15.4	78.6	25.0
Размах варьирования	3.6	5.9	7.7	1.4	1.4	2.9	3.6	3.6
Среднее значение	4.4	41.7	30.7	4.8	4.7	13.6	76.8	23.2
Коэффициент вариации, %	36.0	5.3	9.4	10.3	11.6	10.2	1.8	6.0

Таблица 2. Статистические показатели свойств старопашотного горизонта, использованных для расчета запасов ПОВ ($n = 50$)

Параметр	Содержание ПОВ, %				Плотность сложения, г/см ³				Мощность горизонта, см
	0–5 см	5–10 см	10–15 см	15–b см	0–5 см	5–10 см	10–15 см	15–b см	
Минимум	1.40	0.83	0.49	0.48	1.15	1.40	1.44	1.47	20
Максимум	3.20	2.06	1.77	1.87	1.53	1.56	1.56	1.58	33
Размах варьирования	1.80	1.23	1.28	1.39	0.38	0.16	0.12	0.11	13
Среднее значение	2.03	1.27	1.04	0.98	1.33	1.48	1.50	1.53	26.7
Коэффициент вариации, %	16.7	19.3	21.5	20.7	7.8	3.0	3.0	2.1	14

sation Plugin [35]. Анализ данных проводили в статистической среде R [50].

Выделение типов залежной растительности, проведенное по вегетационным индексам, проверялось на местности полевым геоботаническим обследованием, которое проводилось в июле по методике [17]. Растительный покров описывался на 10 пробных пунктах, разбросанных случайно по обследованному сообществу. Для описания луговой растительности площадь пробных пунктов составляла 1 м², для древесных сообществ 10 м². Ботаническое описание проводилось по определителю [14], а также с применением электронного приложения iNaturalist.org [41].

Обилие корневого массива в старопашотном горизонте определяли для слоев мощностью 0–10 и 10–20 см на участках с низким, средним и высоким запасом ПОВ. На каждом участке отбирали по два монолита (25 × 25 см²). Оценку обилия корней проводили в соответствии с работой [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Статистические показатели пространственного варьирования содержания фракций гранулометрического состава по залежному участку представлены в табл. 1. Анализ данных показывает, что сильное пространственное варьирование наблюдается только по содержанию фракции крупного и среднего песка (1–0.25 мм). По содержанию более мелких фракций почвенный покров

участка может оцениваться как достаточно однородный.

В табл. 2 приведены статистические показатели пространственного варьирования содержания ПОВ и плотности сложения послойных образцов из старопашотного горизонта, которые использовали для создания карты пространственной изменчивости запасов ПОВ.

Статистические показатели пространственного варьирования запасов ПОВ в отдельных слоях и в целом в старопашотном горизонте представлены в табл. 3.

Из анализа полученных данных можно сделать вывод о существенной дифференциации старопашотного горизонта как по содержанию ПОВ, так и его запасам. Дифференциация старопашотного горизонта в целом может оцениваться как увеличение запасов ПОВ под залежами за счет его вторичного постагрогенного накопления. В современной литературе, посвященной изучению постагрогенных почв, общее накопление органического углерода под залежами принимается большинством авторов, но отношение к изменению запасов собственно ПОВ не так однозначно. Увеличение запасов ПОВ в залежных серых лесных и дерново-подзолистых почвах отмечалось в работах [1, 10, 24]. В ряде работ наоборот наблюдалось ухудшение гумусного состояния почв и уменьшение в определенных условиях запасов ПОВ [12, 13]. Есть работы, в которых указывается на отсутствие статистически значимого измене-

Таблица 3. Статистические показатели запасов ПОВ, рассчитанные по интерполированным картам изменения содержания ПОВ, плотности сложения и мощности старопахотного горизонта

Параметр	Запасы ПОВ, кг/м					Накопленные запасы ПОВ в слое 0–10 см, кг/м ²
	0–5 см	5–10 см	10–15 см	15–b см	в старопахотном горизонте	
Минимум	1.07	0.83	0.67	1.23	4.02	0.61
Максимум	1.90	1.25	0.95	2.46	6.56	1.33
Размах варьирования	0.83	0.42	0.28	1.24	2.54	0.72
Среднее значение	1.31	0.94	0.79	1.74	4.78	0.84
Коэффициент вариации, %	12.9	12.6	11.4	18.3	12.3	16.1

ния запасов ПОВ под залежной растительностью [42]. В работе [39] проведен метаанализ 74 литературных источников, из которого следует, что при естественном зарастании пашни лесом запас ПОВ увеличивается на 53%. По мнению Рыжовой с соавт. [20] изменение гумусного состояния постагрогенных почв разнонаправлено и может зависеть от биоклиматических условий, типа и свойств почвы, характера использования пахотных угодий, а также их гранулометрического состава. Существенное влияние на гумусное состояние залежных почв может оказывать возраст залежей, определяющий сукцессии постагрогенной растительности. Например, в работе [25] показано заметное увеличение в таежной зоне запасов гумуса в первые 5–7 лет после прекращения распашки до возраста залежи в 40 лет и уменьшение запасов гумуса в последующем под пологом 90–100-летнего леса. Известно, что для сукцессии залежей, соответствующей луговой травянистой растительности, зарастающей древесными породами, характерно наиболее широкое видовое разнообразие, выраженная контагиозность, а также сложность и пестрота фитоценоза [13]. Поэтому широкое варьирование запасов ПОВ на исследованном участке под различными типами залежной растительности можно считать вполне ожидаемым. В целом содержание ПОВ на залежном участке характеризуются средними значениями варьирования, такие же показатели обычно наблюдаются в пахотных горизонтах дерново-подзолистых и серых лесных почв [16, 21].

Для характеристики пестроты залежной растительности с использованием вегетационных индексов было проведено зонирование массива залежи по типам преобладающей растительности. Результаты кластеризации показали, что максимально можно выделить 4 кластера. В дальнейшем для подбора оптимальной структуры зонирования участка на типы растительного покрова были использованы карты, на которых выделялись 2, 3 и 4 типа растительности (рис. 1а–1с).

Проводилась оценка перспективности использования результатов зонирования залежной

растительности по вегетационным индексам для количественной характеристики накопления ПОВ в постагрогенных почвах. Для этого с применением дисперсионного анализа проводили оценку статистической значимости различий в запасах ПОВ в слоях старопахотного горизонта на участках с разными типами (кластерами) растительности. Наличие статистически значимой разницы в запасах ПОВ было обнаружено только для верхнего (0–5 см) слоя. Результаты сравнения методов кластеризации, по разнице в запасах ПОВ в слое 0–5 см под различными типами растительного покрова представлены в табл. 4.

Статистически значимые различия по запасам ПОВ в слое (0–5 см) старопахотного горизонта получены только для моделей с 3 и 4 типами залежной растительности. Оценка критериев статистической значимости зонирования залежного участка на типы растительности по различиям в запасах ПОВ в верхнем слое старопахотного горизонта с применением алгоритмов *k*-средних и “случайного леса” показывает, что выделение трех типов (кластеров) растительности является более надежным, чем четырех типов.

Итоговые карты, полученные по вегетационным индексам и результатам полевого геоботанического обследования, представляют следующие типы растительного покрова: лиственная древесная растительность, хвойная древесная растительность, травянистая растительность. Показано, что для первого типа (лиственная древесная растительность) характерно преобладание молодого леса из березы повислой (*Betula pendula*), возрастом до 20 лет. Данный фитоценоз представляет собой густой березняк с бедным видовым составом в травостое. Местами встречается *Fragaria vesca* L., *Veronica chamaedrys* L., *Carex* sp., единичный подрост сосны *Pinus sylvestris* L. Название этого класса – березняк землянично-осоковый. Для второго типа (хвойная древесная растительность) характерно преобладание молодой сосны (*Pinus sylvestris* L.) возрастом до 25 лет. Травяной покров практически отсутствует. Название сообщества – сосняк мертвопокровный. Для тре-



Рис. 1. Карты пространственного зонирования залежной растительности по результатам кластеризации: (а) выделено 2 типа растительности (древесная (I) и травянистая (II)), (б) выделено 3 типа растительности (древесная лиственная (Ia), древесная хвойная (Ib) и травянистая (II)), (с) выделено 4 типа растительности (древесная лиственная (Ia), древесная хвойная (Ib), травянистая (IIa) и травянистая, зарастающая древесными породами (IIb)).

твого типа характерно доминирование разнотравного луга с преобладанием *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth. и *Erigeron annuus* (L.) Desf. Название – луг разнотравный, вейниково-мелкопестниковый. В травостое доминируют: *Erigeron annuus* (L.) Desf., *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth., *Hypericum perforatum*, *Viscaria vulgaris* Bernh., *Pilosella* sp., *Rhinanthus serotinus*, *Jacobaea vulgaris*, *Tanacetum vulgare* L. В целом границы залежных фитоценозов (3 типа), выделенные по данным геоботанического обследования, соответствуют границам определенным по данным ДЗЗ.

Результаты множественной проверки показателей запасов ПОВ по типам растительности приведены в табл. 5. Статистически значимые разли-

чия получены только при оценке влияния типов растительности на запасы ПОВ в верхнем слое (0–5 см) старопашотного горизонта, а также накопленных запасов в слое (0–10 см). Видимо, накопление ОВ в слоях ниже 10 см является незначительным и не показывает статистически значимой разницы под различными типами залежной растительности.

Табл. 5 показывает, что статистически значимые различия в запасах ПОВ верхнего слоя (0–5 см) старопашотного горизонта присутствуют только для массивов, занятых древесной хвойной растительностью и травянистой растительностью. Различия по накопленным запасам гумуса в верхнем слое (0–10 см) значимо проявляются на участках

Таблица 4. Результаты дисперсионного анализа различий запасов ПОВ в слое (0–5 см) старопашотного горизонта по типам растительности, полученные разными методами кластеризации

Метод кластеризации	Количество кластеров	Модель GLS			Модель GLS+Sp		
		Chi sq	p-value	AIC	Chi sq	p-value	AIC
k-средние	2	0.004	0.948	176.774	1.423	0.233	169.998
	3	8.039	0.018	170.825	8.092	0.017	165.436
	4	8.720	0.033	171.347	9.692	0.021	164.984
Случайный лес	2	0.005	0.945	176.754	2.898	0.089	168.684
	3	7.900	0.019	170.944	5.763	0.056	167.421
	4	9.663	0.022	170.667	7.707	0.052	167.010

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые различия.

Таблица 5. Результаты попарного сравнения показателей запасов ПОВ под различными типами залежной растительности

Гипотеза*	Разница	Стандартная ошибка	<i>p</i> -value
Запасы ПОВ в слое 0–5 см, кг/м ²			
2 – 1 = H_0	1.085	0.4833	0.0633
3 – 1 = H_0	1.3437	0.4835	0.015
3 – 2 = H_0	0.2587	0.4103	0.8026
Накопленные запасы ПОВ в слое 0–10 см			
2 – 1 = H_0	1.0197	0.4305	0.0467
3 – 1 = H_0	1.137	0.4289	0.0217
3 – 2 = H_0	0.1173	0.3669	0.945

* Обозначения: 1 – хвойная древесная растительность, 2 – лиственная древесная растительность, 3 – травянистая растительность.

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые различия.

Таблица 6. Оценка веса корневой массы залежной растительности и запасов ПОВ в послойных образцах старопахотного горизонта (0–10 и 10–20 см), кг/м²

№ образца	Запас ОВ в слое			Содержание сухого вещества корней в слое		
	0–10 см	10–20 см	0–20 см	0–10 см	10–20 см	0–20 см
1.1	2.02	1.85	3.88	0.414	0.076	0.490
1.2	2.03	1.99	4.03	0.398	0.060	0.458
2.1	2.32	2.18	4.49	0.635	0.105	0.740
2.2	2.35	2.21	4.56	0.860	0.099	0.959
3.1	2.45	2.25	4.69	1.147	0.152	1.299
3.2	2.49	2.38	4.87	0.894	0.086	0.980

под лиственной древесной и хвойной древесной растительностью, а также между травянистой и хвойной древесной растительностью. Значимой разницы по запасам ПОВ между участками, занятыми древесной лиственной растительностью и травянистой растительностью не наблюдалось.

Результаты оценки обилия корневой массы растительности и запасов ПОВ в послойных образцах (0–10 и 10–20 см) старопахотного горизонта приведены в табл. 6. Точки отбора образцов были приурочены к различным типам залежной растительности, которые были определены как тип древесная лиственная растительность (образцы 1.1, 1.2 и 2.1) и травянистая растительность (образцы 2.2, 3.1 и 3.2).

Наблюдается тесная корреляция ($r = 0.91$, $p = 0.01$) между содержанием сухого вещества корней и общим запасом ОВ в слое (0–10 см) старопахотного горизонта. Между содержанием сухого вещества корней и показателями запасов ПОВ в слое (10–20 см) также наблюдается прямая зависимость, но теснота связи существенно ниже и статистически не значима ($r = 0.51$, $p = 0.30$). Наличие прямых и обратных связей между содержанием ПОВ и состоянием растительности является

общеизвестным [19], и отражает как влияние содержания ПОВ на развитие корневой массы, так и влияние обилия растительности на гумусное состояние почв. Закономерности накопления ПОВ под залежами не являются исключением, но статистически значимые различия проявляются видимо только в самой верхней части старопахотного горизонта, т.е. в наиболее богатом корнями слое, где в основном происходит преимущественное накопление новообразованного под залежами ПОВ [10, 43].

Необходимо признать, что залежные почвы являются очень трудным объектом для моделирования пространственной неоднородности запасов ПОВ, поскольку на исходную пространственную неоднородность старопахотной почвы будет сложным образом накладываться неоднородность накопления ПОВ под залежной растительностью. Существенные затруднения картографирования залежных земель также связаны с тем, что отдельные массивы залежей, представляют собой достаточно небольшие участки, которые соответствуют рабочим участкам полей севооборотов, площадь которых не превышает обычно нескольких десятков, реже сотен гектар. В работе [40] бы-

ло показано, что только применение сложных методов пространственного прогноза (нейронных сетей с обратным распространением (BPNN) и машинного экстремального обучения (ELM)) позволяет выявить пространственную неоднородность запасов ПОВ на пашне в пределах отдельных полей севооборотов при совместном использовании в качестве предикторов отдельных спектральных полос и трех вегетационных индексов, отражающих развитие рапса и содержание ПОВ. Вероятно, для диагностики различий в накоплении ПОВ под залежной травянистой и лиственной древесной растительностью необходимо применение более сложных методов пространственного анализа, а также использование вегетационных индексов вместе с другими предикторами пространственного прогноза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Классификация залежной растительности методом k -средних с выделением 3 типов является оптимальным способом кластеризации по вегетационным индексам, рассчитанным по данным ДЗЗ для постагрогенных участков, зарастающих одновременно хвойной, лиственной и травянистой растительностью. Результаты попарного сравнения участков, занятых различными типами залежной растительности, показывают наличие значимых различий по запасам ПОВ только в самом верхнем слое (0–5 см) старопахотного горизонта и только для массивов, занятых древесной хвойной и травянистой растительностью. Различия по накопленным запасам ПОВ в верхнем слое (0–10 см) статистически значимо различаются в почвах, находящихся под лиственной и хвойной древесной растительностью, а также между травянистой и хвойной растительностью. Значимой разницы по данному показателю между участками, занятыми древесной лиственной растительностью и травянистой растительностью, не наблюдается.

В целом можно сделать вывод, что зонирование залежной растительности с использованием вегетационных индексов перспективно для картографирования гумусного состояния залежных земель. Вместе с тем можно допустить, что только применение достаточно продвинутых алгоритмов пространственного прогноза и комплексное использование различных предикторов, может обеспечить получение надежной информации из совокупности сложных взаимосвязанных переменных, влияющих на накопление ПОВ под залежами и повысить точность цифрового картографирования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-24-00242.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.2.275-292>
3. Гиниятуллин К.Г., Сахабиев И.А., Смирнова Е.В. Цифровое картографирование показателей, определяющих сорбционные свойства почв по отношению к поллютантам, по данным дистанционного зондирования Земли с применением машинного обучения // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 1. С. 84–92. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.1.8>
4. Добровольский В.В. Практикум по географии почв с основами почвоведения. М.: Гуманит. Изд. Центр ВАДОК, 2001. 144 с.
5. Иванов А.Л., Завалин А.А., Кузнецов М.С., Захаренко В.А., Свищев И.П., Карпухин А.И., Исаев В.А., Гулюк Г.Г., Чекмарев П.А., Ефанов П.А., Кирюшин В.И., Хитров Н.Б., Романенко Г.А. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель, выбывших из активного сельскохозяйственного производства. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2008. 64 с.
6. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
7. Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>
8. Кудеяров В.Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1901009X>
9. Кудеяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>
10. Кузнецова И.В., Тихонравова П.И., Бондарев А.Г. Изменение свойств залежных серых лесных почв // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1142–1150. <https://doi.org/10.1134/S1064229309090142>
11. Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Швиденко А.З., Сапожников П.М. Изменение общего пула органического углерода в залежных почвах России в

- 1990–2004 гг // Почвоведение. 2010. № 3. С. 361–368.
12. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Изменение гумусного состояния дерново-подзолистой глееватой песчаной почвы на залежи // Почвоведение. 2007. № 11. С. 1323–1329.
 13. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX в. и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
 14. Маевский П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 635 с.
 15. Некрич А.С., Люри Д.И. Изменения динамики аграрных угодий России в 1990–2014 гг. // Известия РАН. Сер. географическая. 2019. № 3. С. 64–77. <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019364-77>
 16. Орешкина Н.С. Статистические оценки пространственной изменчивости свойств почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 112 с.
 17. Рогова Т.В., Шайхутдинова Г.А. Биоразнообразие и динамика наземных экосистем. Методическое пособие для проведения учебной практики. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. 60 с.
 18. Романовская А.А. Органический углерод в почвах залежных земель России // Почвоведение. 2006. № 1. С. 52–61.
 19. Росновский И.Н. Системный анализ и математическое моделирование процессов в почвах: Учеб. пособие. Томск: Томский государственный университет, 2007. 312 с.
 20. 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. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090111>
 21. Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: На примере дерново-подзолистых почв. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 160 с.
 22. Сидорова В.А. Динамика пространственного варьирования почвенных свойств луговых агроценозов Карелии при постантропогенном развитии // Российский журн. прикладной экологии. 2016. № 3. С. 23–27.
 23. Сорокина О.А., Данилов А.Н. Оценка плодородия почвы залежи на сопряженных элементах рельефа в Красноярской лесостепи // Плодородие. 2016. № 2. С. 31–34.
 24. 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. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13100134>
 25. 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. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16010111>
 26. Цифровая почвенная картография / Отв. ред. Савин И.Ю., Докукин П.А. М.: РУДН, 2017. 156 с.
 27. Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щенащенко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030047>
 28. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030028>
 29. Baijes N.H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks // Geoderma. 2016. V. 269. P. 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.034>
 30. Baijes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // Eur. J. Soil Sci. 2014. V. 65. № 1. P. 10–21. https://doi.org/10.1111/EJSS.12114_2
 31. Bicego M. K-Random Forests: A K-means style algorithm for Random Forest clustering // Proc. Int. Jt. Conf. Neural Networks. 2019. V. 2019. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2019.8851820>
 32. Braimoh A.K., Vlek P.L.G. Impact of land use on soil resources // L. Use Soil Resour. Springer Netherlands. 2008. P. 1–7. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6778-5_1/cover
 33. Camera C., Zomeni Z., Noller J.S., Zissimos A.M., Christoforou I.C., Bruggeman A. A high resolution map of soil types and physical properties for Cyprus: A digital soil mapping optimization // Geoderma. 2017. V. 285. P. 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.019>
 34. Chavez P. Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved // American Society of Photogrammetry. 1996. № 62. P. 1025–1036.
 35. Congedo L., Munafò M., Macchi S. Investigating the relationship between land cover and vulnerability to climate change in Dar es Salaam. Rome: Sapienza University, 2013. 58 p.
 36. Fathizad H., Taghizadeh-Mehrjardi R., Hakimzadeh Ardakani M.A., Zeraatpisheh M., Heung B., Scholten T. Spatiotemporal Assessment of Soil Organic Carbon Change Using Machine-Learning in Arid Regions // Agron. 2022. V. 12. № 3. P. 628. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030628>
 37. Godwin R.J., Miller P.C.H. A Review of the Technologies for Mapping Within-field Variability // Biosyst. Eng. 2003. V. 84. № 4. P. 393–407. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00283-0](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00283-0)
 38. Grunwald S., Yu C., Xiong X. Transferability and Scalability of Soil Total Carbon Prediction Models in Florida, USA // Pedosphere. 2018. V. 28. № 6. P. 856–872. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60048-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60048-7)
 39. Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stock and land use change: A meta-analysis // Global Change Biol. 2002. V. 8. № 4. P. 345–360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
 40. Guo L., Fu P., Shi T., Chen Y., Zhang H., Meng R., Wang S. Mapping field-scale soil organic carbon with unmanned aircraft system-acquired time series multispectral images // Soil Tillage Res. 2020. V. 196. P. 104477. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2019.104477>

41. iNaturalist. 2022. URL: <https://www.inaturalist.org/> (дата обращения: 17.11.2022).
42. 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.019>
43. Kurganova I.N., Kudyarov V.N., De Gerenyu L. Updated estimate of carbon balance on Russian territory // *Tellus*. 2010. V. 62. № 5. P. 497–505. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00467.x>
44. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // *Catena*. 2015. V. 133. P. 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.06.002>
45. Landsat 8 (L8) data users handbook. South Dakota: EROS. Sioux Falls, 2015. 106 p.
46. Lo Seen D., Ramesh B.R., Nair K.M., Martin M., Arrouays D., Bourgeon G. Soil carbon stocks, deforestation and land-cover changes in the Western Ghats biodiversity hotspot (India) // *Glob. Chang. Biol.* 2010. V. 16. № 6. P. 1777–1792. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2009.02127.X>
47. Martin M.P., Orton T.G., Lacarce E., Meersmans J., Saby N.P.A., Paroissien J.B., Jolivet C. et al. Evaluation of modelling approaches for predicting the spatial distribution of soil organic carbon stocks at the national scale // *Geoderma*. 2014. V. 223–225. № 1. P. 97–107. <https://doi.org/10.1016/J.geoderma.2014.01.005>
48. Matinfar H.R., Maghsodi Z., Mousavi S.R., Rahmani A. Evaluation and Prediction of Topsoil organic carbon using Machine learning and hybrid models at a Field-scale // *catena*. 2021. V. 202. P. 105258. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105258>
49. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 2016. <https://www.qgis.org/en/site/> (дата обращения: 17.11.2022).
50. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna. Austria. URL: <http://www.r-project.org/index.html> (дата обращения: 17.11.2022).
51. Sahabiev I., Smirnova E., Giniyatullin K. Spatial Prediction of Agrochemical Properties on the Scale of a Single Field Using Machine Learning Methods Based on Remote Sensing Data // *Agron*. 2021. V. 11. P. 2266. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112266>
52. Saleh A.M. Relationship Between vegetation Indices of Landsat-7 ETM+, MSS Data and Some Soil Properties: Case Study of Baqubah, Diyala, Iraq // *IOSR J. Agric. Vet. Sci. Ver. II*. 2015. V. 8. № 2. P. 2319–2372. <https://doi.org/10.9790/2380-08221831>
53. Schillaci C., Perego A., Valkama E., Märker M., Saia S., Veronesi F., Lipani A. et al. New pedotransfer approaches to predict soil bulk density using WoSIS soil data and environmental covariates in Mediterranean agro-ecosystems // *Sci. Total Environ*. 2021. V. 780. P. 146609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146609>
54. Taghizadeh-Mehrjardi R., Nabiollahi K., Kerry R. Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran // *Geoderma*. 2016. V. 266. P. 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.12.003>
55. Thompson J.A., Kolka R.K. Soil Carbon Storage Estimation in a Forested Watershed using Quantitative Soil-Landscape Modeling // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2005. V. 69. № 4. P. 1086–1093. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2004.0322>
56. Vågen T.G., Winowiecki L.A., Tondoh J.E., Desta L.T., Gumbrecht T. Mapping of soil properties and land degradation risk in Africa using MODIS reflectance // *Geoderma*. 2016. V. 263. P. 216–225. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2015.06.023>
57. Vågen T.G., Winowiecki L.A., Abegaz A., Hadgu K.M. Landsat-based approaches for mapping of land degradation prevalence and soil functional properties in Ethiopia // *Remote Sens. Environ*. 2013. V. 134. P. 266–275. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2013.03.006>
58. 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. Pergamon*. 2010. V. 36. № 10. P. 1261–1267. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2010.04.005>

Possibility of Using Zoning of Fallow Vegetation according to Vegetation Indices to Assess the Patterns of Accumulation of Organic Matter in Post-Agrogenic Soils

K. G. Giniyatullin¹*, I. A. Sahabiev¹, S. S. Ryazanov², E. V. Smirnova¹,
D. V. Tishin¹, and L. I. Latypova¹

¹Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

²Institute of Ecology and Subsoil Use Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, 420087 Russia

*e-mail: giniyatullin@mail.ru

An array of Eutric Retisols (Loamic, Cutanic, Ochric) was studied under a fallow aged 20–25 years, which is in the stage of overgrowth of meadow vegetation, pine and birch. The site is confined to one element of the relief, has no morphological signs of the development of erosive processes and is characterized by a homogeneous granulometric composition. To assess the influence of fallow vegetation type on the formation of soil organic matter (SOM) reserves, vegetation cover was zoned according to vegetation indices calculated on the basis of remote sensing (RS) data. The “k-means” algorithms and the “random forest” method were used for

zoning. It was shown that there were statistically significant differences between the types of land cover in terms of reserves of SOM in the upper layer of the old-arable horizon with the allocation of 3 and 4 clusters. It is shown that the most expedient is the allocation of 3 classes of fallow vegetation using the “*k*-means” algorithm: coniferous woody vegetation, deciduous woody vegetation and herbaceous vegetation. The correctness of the allocation of these classes was confirmed by a field geobotanical survey of the territory. The results of a pairwise comparison of sites occupied by various types of fallow vegetation show the presence of significant differences in the reserves of the SOM only in the uppermost layer (0–5 cm) of the old arable horizon and only when compared with the array occupied by woody coniferous vegetation and herbaceous vegetation. Differences in accumulated humus reserves in the upper layer of 0–10 cm are statistically significant in soils under deciduous and coniferous woody vegetation, as well as between herbaceous and coniferous vegetation. There was no significant difference in this indicator between the areas occupied by woody deciduous vegetation and herbaceous vegetation.

Keywords: fallow soils, soil organic matter, spatial modeling, vegetation indices, Eutric Retisols (Loamic, Cutanic, Ochric)