

ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТАХ ЗАУРАЛЬЯ (РОССИЯ)

А. Р. Сулейманов, И. О. Туктарова, Л. Н. Белан, И. Г. Асылбаев,
Р. Р. Сулейманов, Р. Р. Мирсаяпов

Уфимский государственный нефтяной технологический университет, г. Уфа, Россия, filpip@yandex.ru

Количественное и пространственное определение содержания органического углерода почвы (ПОУ) имеет решающее значение для понимания динамики углерода в наземных экосистемах. Целью данного исследования было цифровое картографирование ПОУ в степной зоне Зауралья (Россия) с использованием метода машинного обучения «случайный лес». В исследовании использовался набор данных, содержащий 1305 точек обследований на глубине почвы 0–20 см. Объясняющие переменные для моделирования ПОУ были представлены основными факторами почвообразования. Согласно интерпретации модели машинного обучения, климат и высота рельефа были ключевыми факторами, влияющими на прогнозирование концентраций ПОУ. Данное исследование показало целесообразность использования методов машинного обучения для цифрового картографирования ПОУ и выявления ведущих факторов, влияющих на его динамику.

Ключевые слова: цифровая почвенная картография; почвенный органический углерод; машинное обучение; случайный лес.

Введение. В условиях глобального потепления органический углерод почвы (ПОУ) имеет ключевую роль так как почвы хранят крупнейшие наземные запасы органического углерода [1]. В этом отношении почва является крупнейшим резервуаром для улавливания и поглощения CO₂ из атмосферы, что способствует смягчению последствий изменения климата [2]. Информация о ПОУ и его пространственном распределении особенно необходима для разработок действий в области изменения климата и оценок темпов секвестрации на различных масштабах, от локального до глобального.

Степные почвы играют важную роль в поддержании здоровья и баланса экосистем, особенно в полужасушливых областях. Эти обширные луговые экосистемы вносят значительный вклад в глобальный круговорот углерода. Степные почвы обладают высоким содержанием ПОУ, образующегося в результате накопления и разложения растительных остатков.

Россия является крупнейшей страной в мире, охватывающей разнообразные ландшафты и типы почв, что обуславливает необходимость проведения комплексного картографирования почвенных свойств. Обширная территориальная протяженность России подчеркивает важность учета пространственной изменчивости почв в различных регионах и экосистемах, что позволяет эффективно реализовывать индивидуальные стратегии управления земельными ресурсами и методы устойчивого развития.

В связи с этим мы поставили следующие задачи в исследовании: (1) спрогнозировать пространственное распределение ПОУ в поверхностном слое методом машинного обучения и (2) установить наиболее значимые переменные окружающей среды, влияющие на распределение ПОУ.

Материалы и методы исследований. Исследование проведено в Республике Башкортостан, Россия, на территории двух районов (Баймакского и Хабуллинского), занимающих южную часть степной зоны Зауралья. Географическое положение исследуемого региона находится примерно между $51,6^\circ$ и $53,2^\circ$ северной широты и 54° и 60° восточной долготы (рис. 1). Степная зона Зауралья представляет собой преимущественно равнинный или пологоволнистый рельеф, с редкими невысокими холмами и речными долинами. Степная территория характеризуется широкими открытыми пространствами с относительно низкими перепадами высот по сравнению с окружающими горными районами. Климат континентальный, характеризуется суровыми зимами с холодными температурами и частыми снегопадами, а лето, как правило, относительно теплое и сухое.

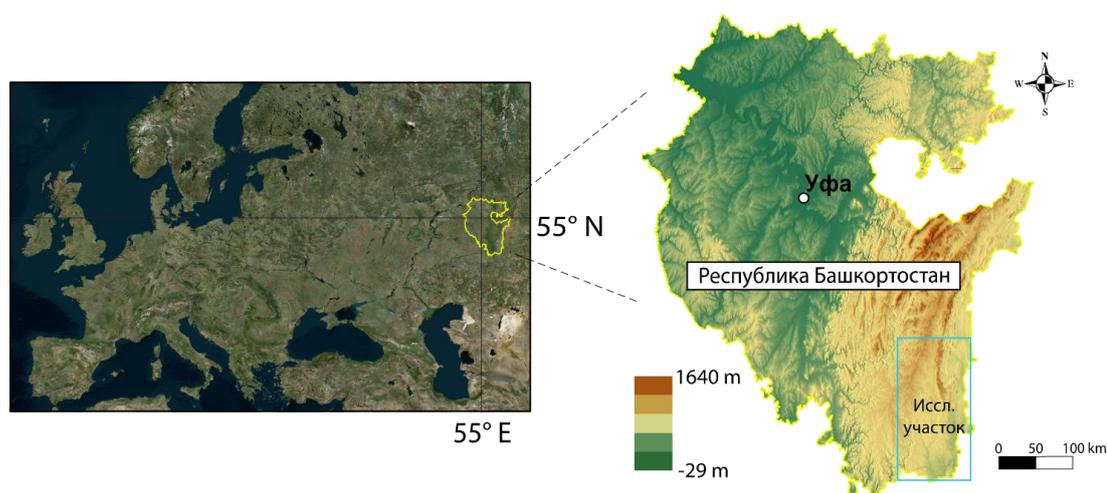


Рис. 1. Место расположения Республики Башкортостан и участка исследования

Преобладающими типами почв на степных равнинах являются черноземы (Haplic Chernozems (Loamic or Clayic, Tonguic), тогда как в южных районах встречаются засоленные почвы, представленные черноземами (Haplic Endosalic), солончаками и солонцами. Породообразующие породы представлены преимущественно делювиальными желто-коричневыми карбонатными глинами и тяжелыми суглинками.

Для работы использовался набор данных с 1316 пробами почвы из верхнего слоя (0-20 см). В данных образцах содержание ПОУ было определено классическим методом по Тюрину в модификации Никитина со спектрофотометрическим окончанием по Орлову и Гринделю [3].

В этом исследовании мы использовали различные переменные (ковариаты) для пространственного моделирования ПОУ, представляющие ключевые факторы почвообразования: рельеф и производные топографические атрибуты, климат, гидрология, геологические классы и осадочные отложения, данные дистанционного зондирования, индексы растительности, типы землепользования и почв. Пространственное разрешение всех переменных составляло 250 м на пиксель.

Для цифрового моделирования содержания ПОУ мы использовали алгоритм случайный лес. Случайный лес — это метод машинного обучения, который способен обрабатывать сложные взаимодействия между объясняющими переменными и прогнозируемым параметром. Чтобы оценить эффективность модели случайного леса при прогнозировании содержания ПОУ, мы применили 10-кратный подход перекрестной проверки и рассчитали несколько показателей ошибок: среднеквадратическая ошибка (RMSE) и коэффициент детерминации (R^2).

Цифровое картографирование содержания ПОУ, процедура подготовки ковариат, и перекрестная проверка выполнялись с использованием встроенных функций и внешних пакетов языка программирования R: «psych», «terra», «caret», «ranger» и др.

Результаты и их обсуждение. Согласно перекрестной оценке модели машинного обучения, были получены следующие значения: RMSE = 0.86% и $R^2 = 0.42$. На рис. 2 представлен результат пространственного моделирования содержания ПОУ методом случайного леса в комбинации с факторами окружающей среды. Характер содержания ПОУ характеризовался снижением к югу, тогда как максимальные уровни концентрировались в горных районах запада и северо-запада.

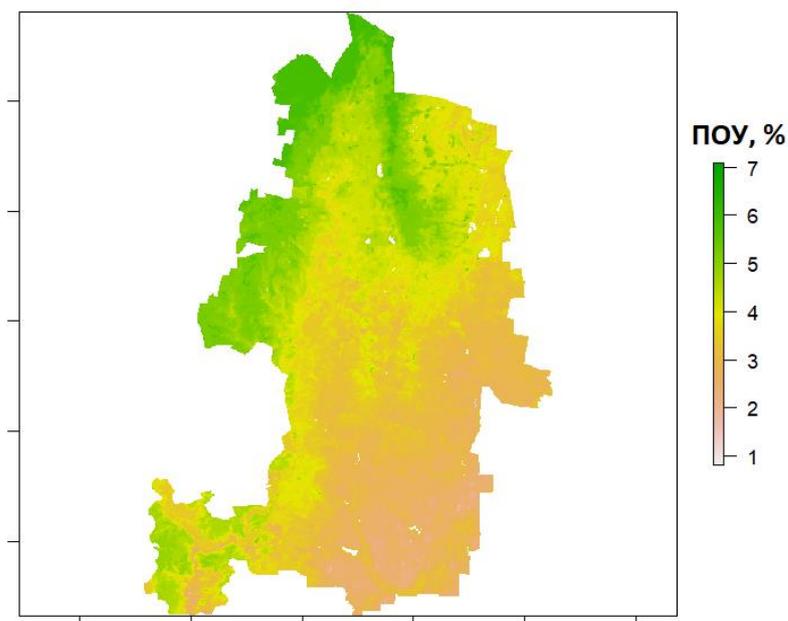


Рис. 2. Цифровая карта содержания ПОУ

Пространственные закономерности уровней ПОУ хорошо прослеживаются от горно-лесной зоны к степной за счет смены основных факторов почвообразования. В степной и горной зонах наблюдаются четко выраженные процессы почвообразования, определяющие особенности почв и их характеристики. Эти территории характеризуются специфическими климатическими условиями, растительным покровом и типами землепользования, которые влияют на динамику ПОУ. Западная часть территории исследований представлена предгорьями Уральских гор, почти полностью покрытыми лесом. Эти лесные массивы, расположенные на возвышенной местности, создают благоприятные условия для накопления ПОУ при минимальном антропогенном воздействии. Напротив, степная зона в значительной степени распаханна и характеризуется более засушливым климатом, с менее густой растительностью, состоящей преимущественно из трав и кустарников. Эти особенности вносят в почву меньше органических веществ, тогда как более высокие температуры и более низкие уровни влажности ускоряют разложение органического материала, что приводит к снижению содержания ПОУ.

Результаты интерпретации модели случайного леса показали, что ПОУ в поверхностном слое контролировался переменными климата и растительности. Суммарная годовая солнечная радиация, количество осадков, высота рельефа и температура поверхности Земли были наиболее важными ковариатами для предсказания пространственного распределения содержания ПОУ.

Заключение. В данном исследовании использовался метод машинного обучения для цифрового моделирования ПОУ в степной зоне Зауралья. Используя набор данных из 1305 точек отбора с 0–20 см слоя, мы получили ценную информацию о пространственном распределении ПОУ и ведущих факторов окружающей среды, влияющих на его вариации. Результаты показали, что переменные климата и высота рельефа были ключевыми факторами, влияющие на прогнозирование ПОУ. На основе выявленных взаимосвязей между ПОУ и ковариатами, создана цифровая карта с пространственным разрешением 250 м на пиксель. Дальнейшие работы, направленные на улучшения результатов моделирования, могут включать повышение пространственного разрешения переменных и интегрирование других факторов почвообразования.

Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «ПРИОРИТЕТ 2030» (Национальный проект «Наука и университет»).

Библиографические ссылки

1. *Batjes N. H.* Total carbon and nitrogen in the soils of the world // *European Journal of Soil Science*. 1996. № 47. С. 151–163.
2. *Lal R.* Agricultural activities and the global carbon cycle // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2004. № 70. С. 103–116.
3. *Орлов Д. С. Гриндель Н. М.* Спектрофотометрическое определение гумуса в почве. // *Почвоведение*. 1967. № 1. С. 112-122.