УДК 631.421
DOI

ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЧВ МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО КРИГИНГА НА ПРИМЕРЕ ЛЕСНОЙ ОПЫТНОЙ ДАЧИ РГАУ–МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА

А.В. ЧИНИЛИН, В.Д. НАУМОВ, В.С. МИХАЛЬЦОВ

(РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева)

В последние годы все больший интерес вызывают гибридные методы интерполяции, которые дают лучшие результаты по сравнению с одиночными подходами. Один из таких гибридных методов известен как регрессионный кригинг, который сочетает в себе регрессионную зависимость отклика от вспомогательных переменных с кригингом остатков от регрессии. В данной статье рассмотрена методология цифрового почвенного картографирования с использованием регрессионного кригинга на примере почвенного покрова Лесной опытной дачи (ЛОД) РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева. Для пространственной интерполяции использовали 87 образцов почв, в которых были определены содержание гумуса, pH водной и солевой вытяжек, а также набор переменных–предикторов (цифровая модель рельефа и производные от нее). В результате построены карты исследуемых свойств почв и изучено влияние характеристик рельефа на пространственную дифференциацию свойств почв. В результате 10–кратной перекрестной проверки показано, что полученная модель для содержания гумуса объясняет 88% дисперсии (RMSE 0.34), модель для величины pH водной вытяжки объясняет 89% дисперсии (RMSE 0.25), модель для величины pH солевой вытяжки – также 89% дисперсии (RMSE 0.31). Моделирование пространственной дифференциации исследуемых свойств почв ЛОД показало, что рельеф территории оказывает значительное влияние на формирование почвенного покрова. Наиболее значимыми переменными в дифференциации содержания гумуса в почвах ЛОД оказались плановая и кросс–секционная кривизны поверхности, значения абсолютных высот, крутизна склонов, относительные превышения в окрестности 100 м, топографический индекс влажности.

Ключевые слова: *цифровая почвенная картография, пространственная интерполяция, почвенно–ландшафтные связи, метод ансамблей деревьев, GSIF.*

Введение

Развитие цифровых методов и технологий информационного анализа определили начало качественно нового этапа в развитии почвенной картографии [4, 17, 21, 22]. За последние десятилетия появились новые технологии (геоинформационные, дистанционные), методы и алгоритмы цифрового (автоматизированного) почвенного картографирования (ЦПК). Созданы предпосылки для начала работ по переработке карт, полученных традиционным способом и созданию новых цифровых карт почв и карт свойств почв, что определяет актуальность исследования. Методы ЦПК основаны на моделях, развивающих гипотезу В.В. Докучаева о почве как функции от факторов почвообразования [9]. В качестве базы для цифровой почвенной картографии A.B. McBratney и др. предложили модель SCORPAN – модель эмпирического количественного описания взаимосвязи между почвой/свойством почвы и набором пространственно–распределенных индикаторов (предикторов):

$$S = f(s, c, o, r, p, a, n) + \varepsilon, \qquad (1)$$

где S – класс почв/свойство, s – другие характеристики почвы, c – климат (локальные климатические характеристики), o – организмы, растительность, фауна, r – рельеф (морфометрические характеристики), p – почвообразующая порода, литология, a – возраст, время, n – пространственное положение, ε – ошибка прогноза/предсказания.

Процесс создания цифровых почвенных карт не противоречит процессу создания традиционных почвенных карт [5]. В основу создания цифровых карт положены фактические данные о почвах и почвенном покрове конкретной территории. При этом используются знания о почвах и факторах окружающей среды, выраженные в бумажной или других формах. При создании цифровых карт руководствуются основными закономерностями, характерными для данной территории, почвенными концепциями, а также знаниями о почвенно–ландшафтных связях факторов почвообразования и почв/свойств почв, о закономерностях распределения структур почвенного покрова и т.п.

Среди подходов ЦПК широко используются разнообразные математические методы: искусственные нейронные сети, дискриминантный анализ; методы, связанные с нечетной логикой; кригинг, ко–кригинг, регрессионный кригинг, классификационные и регрессионные деревья, регрессионный анализ и многие другие [5, 16]. В настоящее время алгоритмы на основе деревьев классификации активно используются для построения почвенных карт и карт свойств почв [2, 18, 20]. Другой подход к ЦПК – «имитация» традиционного почвенного картографирования, при котором более полно используются достижения традиционной почвенной картографии, а методы ЦПК встраиваются в процесс традиционного картосоставления [8]. Для имитации традиционного почвенного картографирования наиболее удобным выглядит использование методов связанных и несвязанных графов (деревьев) или решающих правил, так как они позволяют визуализировать почвенно–ландшафтные связи для их дальнейшей оценки и корректировки [2, 8, 26].

Карты, составленные с помощью подходов ЦПК, отличаются воспроизводимостью и возможностью быстрого обновления.

Цель исследования – создание цифровых карт некоторых почвенных свойств на основе регрессионного кригинга на примере Лесной опытной дачи РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева.

Объект исследования – Лесная опытная дача (ЛОД) площадью около 230 га расположена в северо–западной части города Москвы и составляет юго–западную часть землепользования РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева. По природным условиям она входит в южную зону смешанных хвойно–широколиственных лесов зоны умеренно–континентального климата.

Территория ЛОД расположена на окраине южного склона Клинско–Дмитровской гряды. Рельеф – моренно–равнинный. Холмы, характерные для моренного ландшафта, имеют на территории ЛОД плоский сглаженный характер. Территория ЛОД расположена на самом высоком в пределах ТСХА плоском водораздельном моренном холме с очень пологим склоном на юго–запад и с более крутым склоном на северо–восток (рис. 1). Перепад высот составляет 16 м.

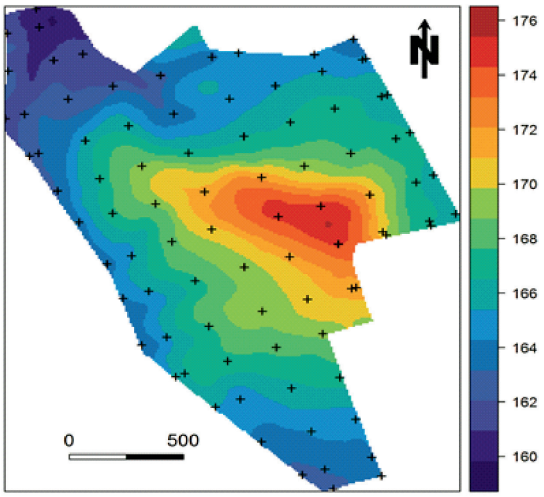

Рис. 1. Цифровая модель рельефа ЛОД.
Регулярная сеть пробоотбора отмечена «+»

По почвенно–географическому районированию территория ЛОД входит в Европейско–Западно–Сибирскую таежно–лесную область, таежно–лесную зону, зону дерново–подзолистых почв южной тайги, в фацию умеренных промерзающих почв [6].

На большей части территории ЛОД распространены автоморфные дерново–подзолистые почвы (Umbrick Albeluvisols в классификации WRB [15], дерново–подзолы иллювиально–железистые по "КиДПР" [3]). Наряду с автоморфными почвами распространены почвы полугидроморфного и гидроморфного рядов. В пределах ЛОД имеются небольшие замкнутые понижения, в которых в период избыточного увлажнения застаиваются поверхностные воды. Кроме того, на территории ряда кварталов расположены заболоченные понижения, приуроченные к местам с близким залеганием грунтовых вод с неудовлетворительным стоком поверхностных вод.

Проведенные полевые почвенные исследования [1, 7] показали, что особенностью дерново–подзолистых почв ЛОД является довольно мощный гумусовый горизонт в значительной части почвенных профилей, который морфологически четко подразделяется на два, а иногда и на три подгоризонта. Средняя мощность гумусово–элювиального горизонта составляет 25–30 см, в отдельных профилях достигая 50 см, а с горизонтом A_1A_2 – 62 см. В связи со значительной мощностью гумусово–элювиального горизонта дерново–подзолистые почвы ЛОД характеризуются большой глубиной залегания элювиального горизонта, нижняя граница которого располагается на глубине 55–65 см.

На строение профилей дерново–подзолистых почв ЛОД заметное влияние оказывает характер почвообразующей породы. Моренный суглинок, являясь основной почвообразующей породой, часто имеет двучленное строение, где верхняя часть песчано–крупнопылеватая по гранулометрическому составу подстилается песками, супесями с включениями гравия и валунов. На склонах моренного холма появляются прослои абляционной морены различного состава: от суглинков до супесей и песков и гравийных отложений.

Таким образом, неоднородный характер почвообразующих пород на фоне довольно сложной геоморфологической обстановки оказывают влияние на строение дерново–подзолистых почв, определяя специфику структуры почвенного покрова ЛОД.

Методы исследования

Для построения моделей и составления цифровых карт свойств почв были отобраны 87 почвенных образцов, большая часть из которых расположена по регулярной сетке на расстоянии 200 м друг от друга и покрывает всю территорию ЛОД (рис. 1). На каждой контрольной точке отбирались смешанные образцы почв с глубины 0–10 см методом «конверта». В почвенных образцах определяли:

- гумус по методу И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова;
- pH солевой вытяжки;
- pH водной вытяжки.

В таблице 1 представлена описательная статистика по исследуемым свойствам.

Таблица 1

Описательная статистика по исследуемым свойствам

Свойство	Число наблюдений	Мин. знач.	1ый квартиль	Медиана	Среднее	3ый квартиль	Макс. знач.
Гумус, %	87	2.77	4.59	5.62	5.72	6.22	10.41
pH H2O	87	4.30	4.90	5.41	5.60	6.08	7.81
pH KCl	87	3.65	4.06	4.34	4.74	5.09	7.61

В качестве ковариат (переменных–предикторов, факторно–индикационных переменных) для составления цифровых карт свойств почв мы использовали цифровую модель рельефа (ЦМР) с разрешением 10 м/пиксель, построенную интерполяцией ординарным кригингом высотных отметок топографического плана. На основе ЦМР был рассчитан набор морфометрических величин: крутизна склонов, их экспозиция, водосборная площадь, топографический индекс влажности, относительные превышения в окрестности 50, 100, 250 и 500 м, плановая, профильная, общая и кросс–секционная кривизны, превышение над водотоком [10]. Все морфометрические величины были рассчитаны с помощью SAGA GIS [14]. Морфометрические свойства рельефа – ковариаты, были использованы для оценки пространственного варьирования исследуемых свойств почв.

На первом этапе применялся разведывательный анализ для выявления наиболее значимых переменных. Исследования показали, что связь между ковариатами и исследуемыми свойствами носит сложный нелинейный характер. В связи с этим в дальнейшей работе в анализ были включены все морфометрические показатели.

Ковариаты, используемые для предсказания исследуемых свойств, показали различный вклад в модели. Этот вклад был оценен с помощью индекса Джини (степень важности каждой переменной), а также с помощью показателя возрастающей ошибки предсказания (показывает, насколько изменяется ошибка предсказания, если случайным образом изменить значения одной из ковариат).

Пространственная интерполяция (прогнозирование), т.е. расчет значений в точках, где не было пробоотбора, по точкам, где значения показателя известны, проводилась с помощью вычислительной среды R, пакеты «rgdal», «GSIF» [25]. Процесс создания карт состоял из нескольких последовательных шагов:

- создание регрессионной матрицы;
- построение модели пространственной интерполяции;
- оценка моделей семивариограмм;
- оценка точности с использованием перекрестной проверки;
- построение карт свойств почв.

В качестве модели пространственной интерполяции нами был выбран регрес-

сионный кригинг (РК) [23, 24]. Он сочетает в себе регрессионную зависимость отклика (исследуемых свойств почв) от вспомогательных переменных (ковариат) с кригингом остатков от регрессии (ур. (2)):

$$z(s_0) = m(s_0) + e(s_0), \qquad (2)$$

где $m(s_0)$ – модель, описывающая регрессионную зависимость, $e(s_0)$ – остатки от регрессии, которые интерполируются ординарным кригингом.

Этот метод, в частности, используется при построении глобальных почвенных карт и набора карт почвенных свойств в проектах SoilGrids [18, 20] и GlobalSoilMap [12], где называется scorpan–kriging.

В качестве модели, описывающей регрессионную зависимость ($m(s_0)$) исследуемых свойств почв от ковариат, использовали метод ансамблей деревьев решений (встречается также перевод «случайный лес») [13]. Этот метод сочетает в себе достижения двух последних десятилетий: бинарное дерево решений, бутстреп аггрегирование, метод случайных подпространств и декорреляцию. [11]. Метод ансамблей деревьев решений превосходит линейные модели, особенно в представлении сложных нелинейных связей между почвами/свойствами почв и ковариатами [19].

Для оценки точности полученных карт свойств почв использовали 10–кратную перекрестную проверку. Каждая модель для каждого из исследуемых свойств (содержание гумуса, pH водной и солевой вытяжек) подбиралась 10–кратно с использованием 90% значений, и предсказанные значения от полученной модели сравнивались с оставшимися 10% значений. Для каждой модели были получены коэффициенты детерминации (R^2 – доля дисперсии, объясняемая моделью), средняя ошибка (ME), корень среднеквадратичной ошибки (RMSE). Доля дисперсии, объясняемая моделью, оценивалась как:

$$R^2 = \left[1 - \frac{SSE}{SST}\right] \times 100\%, \qquad (3)$$

где *SSE* – сумма квадратов ошибки при перекрестной проверке или остаточная сумма квадратов, *SST* – полная сумма квадратов.

Для оценки неопределенности прогнозов были рассчитаны нижний и верхний 90% доверительные интервалы.

Результаты и обсуждение

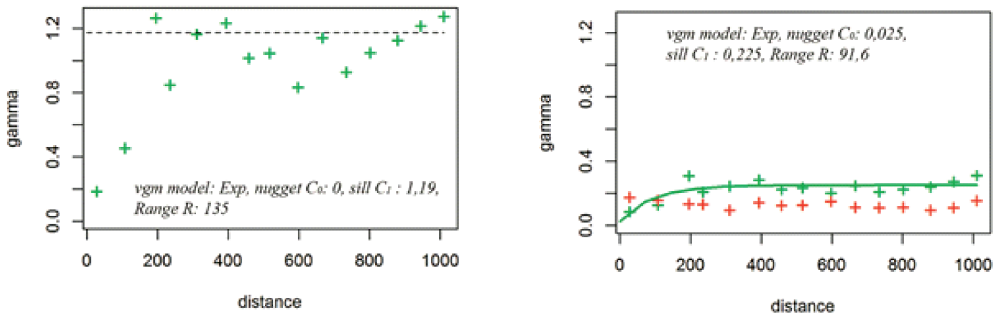

Рис. 2. Модели семивариограмм для содержания гумуса (слева) и для регрессионных остатков при использовании метода ансамблей деревьев решений (справа)

Для описания пространственного распределения содержания гумуса в слое 0–10 см были построены семивариограммы (рис. 2). Одна из них показывает изменение дисперсии разности значений содержания гумуса в двух точках от расстояния

(рис. 2, слева), а другая отображает зависимость дисперсии значений регрессионных остатков при проведении метода ансамблей деревьев решений (рис. 2, справа).

Порог семивариограммы регрессионных остатков (дисперсия ≈ 0.2%) меньше, чем порог семивариограммы содержания гумуса (дисперсия ≈ 1.2%). Метод ансамблей деревьев решений объясняет часть вариабельности содержания гумуса, поэтому дисперсия остатков меньше, чем дисперсия содержания гумуса. Это и приводит к меньшему значению порога. На основе полученных семивариограмм проводилась интерполяция, и были получены карты исследуемых свойств.

Результаты работы показаны в таблице 2 и рисунках 3–6.

Таблица 2

Показатели ошибки предсказания на основе 10–кратной перекрестной проверки

Исследуемое свойство	ME	RMSE, %	R^2
Содержание гумуса, %	0.005	0.34	0.88
pH H2O	–0.007	0.25	0.89
pH KCl	–0.002	0.31	0.89

Как видно из таблицы 2, по результатам перекрестной проверки во всех случаях средняя ошибка предсказания низкая и близка к нулю. Коэффициент детерминации изменяется от 0.88 для содержания гумуса до 0.89 для pH водной и солевой вытяжек со средним значением коэффициента для рассматриваемых свойств в 0.88.

Значения корня из среднеквадратичной ошибки низкие, что так же говорит об успешности пространственного прогнозирования. Результаты перекрестной проверки не показывают какого–либо серьезного смещения (ME ≈ 0), что так же видно из графиков корреляции (рис. 3). В целом, предсказанные значения для всех исследуемых свойств не смещены, не имеют отклонения, т.е. большинство предсказанных значений лежит довольно симметрично относительно линии.

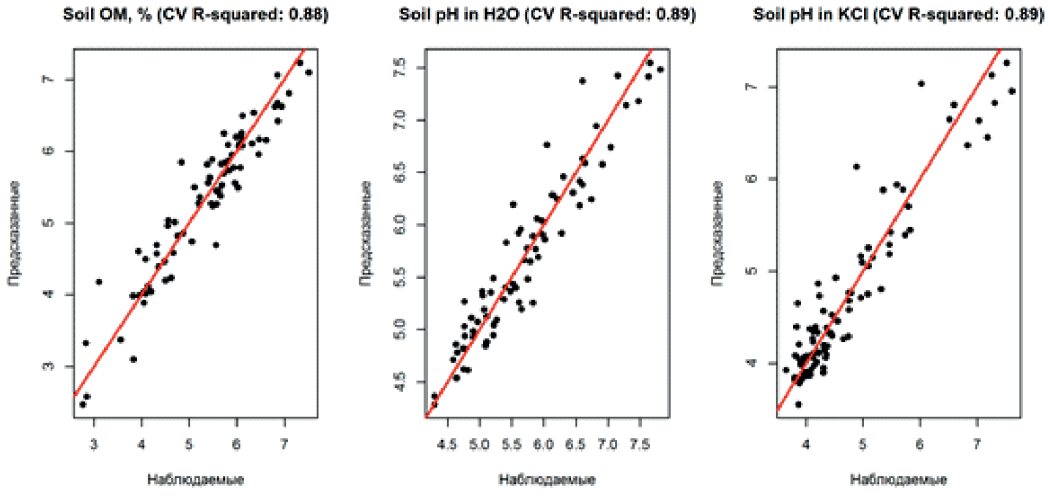

Рис. 3. Графики корреляции для исследуемых свойств между наблюдаемыми и предсказанными значениями по результатам 10–кратной перекрестной проверки

Визуализация предсказанных значений содержания гумуса, pH водной и солевой вытяжек, а также неопределенность прогноза (нижний и верхний 90% доверительные интервалы) дана на рисунках 4–6.

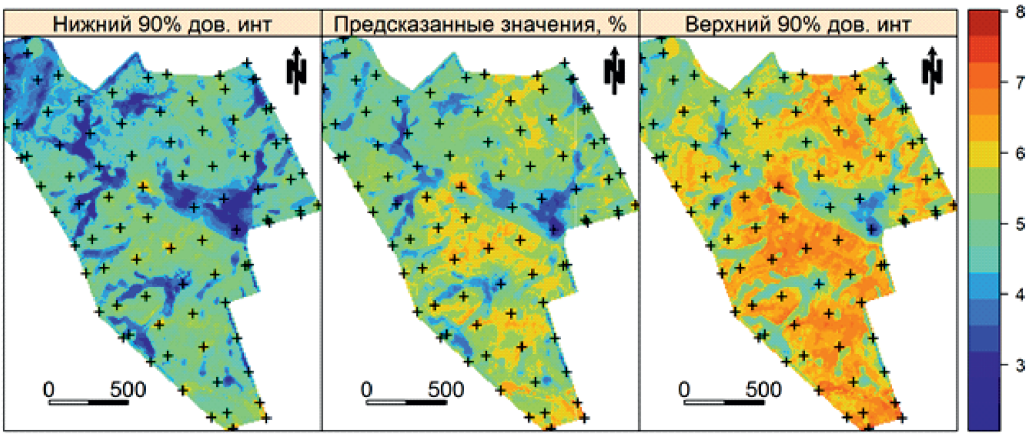

Рис. 4. Карта содержания гумуса (%) в слое 0–10 см в почвах ЛОД ТСХА (в центре), нижний (слева) и верхний 90% доверительные интервалы

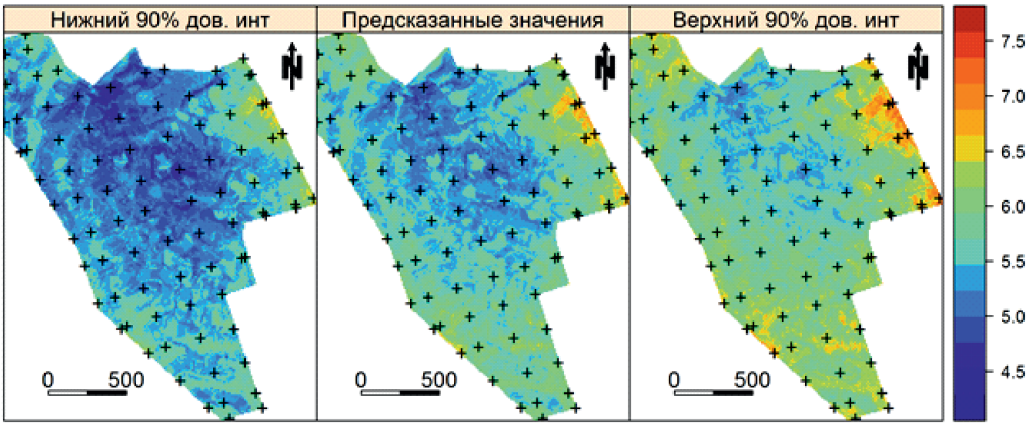

Рис. 5. Карта значений величины pH водной вытяжки почв (в центре) и неопределенность прогноза (нижний и верхний 90% доверительные интервалы)

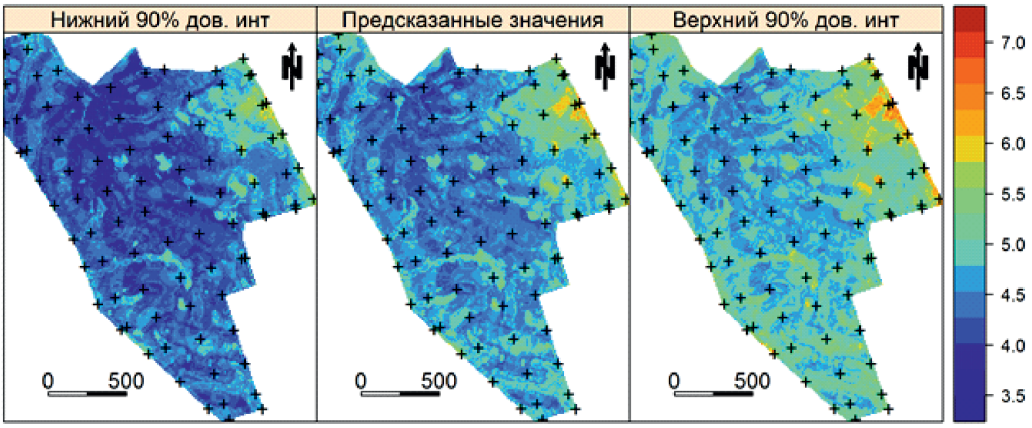

Рис. 6. Карта значений величины pH солевой вытяжки почв (в центре) и неопределенность прогноза (нижний и верхний 90% доверительные интервалы)

Наиболее значимыми ковариатами в дифференциации содержания гумуса в почвах ЛОД оказались плановая и кросс–секционная кривизны поверхности, относительные превышения в окрестности 100 м, индекс топографической влажности, крутизна склонов и значения абсолютных высот.

Согласно полученной карте содержание гумуса в почвах ЛОД варьирует в интервале от 2.5 до 7.5% гумуса (рис. 4). Более низкое содержание гумуса (от 2.5 до 4%) отмечается для положительных значений как плановой, так и кросс–секционной кривизны поверхности, высоких значений индекса относительных превышений в окрестности 100 м и низких значений топографического индекса влажности, соответствующих моренному холму, прилегающих к холму субгоризонтальных поверхностей и некоторым субгоризонтальным поверхностям (шлейфам) в нижних частях склонов, формирующих вытянутые ареалы и древовидную структуру.

Высокое же содержание гумуса характерно, в целом, наоборот, для высоких значений топографического индекса влажности, отрицательных значений плановой и кросс–секционной кривизны поверхности, соответствующих потяжинам, ложбинам и небольшим замкнутым понижениям, что формирует несколько пятнистую структуру. Также более высокое содержание гумуса характерно для склонов теплых экспозиций.

Наиболее значимыми ковариатами в дифференциации величин значений pH водной и солевой вытяжек в почвах ЛОД оказались значения индекса относительных превышений в окрестности 100 м, профильной кривизны, крутизны склонов, топографического индекса влажности и расстояния до водотока.

Наименьшие значения pH (как водной, так и солевой) характерны для ложбин, ложбинообразных и замкнутых понижений северной части ЛОД – области отрицательных значений индекса относительных превышений в окрестности 100 м и высоких значений топографического индекса влажности. Также низкие значения pH характерны для части пологонаклонной водораздельной поверхности и для склонов, примыкающих к моренному холму с юго–запада и северо–востока. Высокие значения величин pH характерны для локальных повышений, образующих пятнистую структуру (области положительных значений индекса относительных превышений в окрестности 100 м), части ложбин и потяжин моренных склонов.

Показатели кислотности почв ЛОД по полученным картам (рис. 5 и 6) изменяются в широком диапазоне. Величина pH водной вытяжки в исследуемых почвах находится в интервале от 4.5 до 7.5, в величина pH солевой вытяжки – от 3.5 до 7. Выявлены повышенные значения величины pH водной вытяжки почв, расположенных вдоль Тимирязевской улицы, улицы Вучетича и вдоль железной дороги Рижского направления. Повышенные значения величины pH солевой вытяжки характерны для почв, расположенных вдоль Тимирязевской улицы. На большей части территории ЛОД величина pH солевой вытяжки находится в пределах от 3.5 до 5, т.е. значительная часть почв относится к группе кислых и сильнокислых.

Выводы

1. Регрессионный кригинг позволил создать надежные пространственные модели ряда свойств почв Лесной опытной дачи РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева.

2. Моделирование пространственной дифференциации исследуемых свойств почв ЛОД с помощью метода регрессионного кригинга показало, что рельеф территории оказывает значительное влияние на формирование почвенного покрова.

3. В ходе перекрестной проверки выявлено, что для всех полученных моделей средняя ошибка предсказания близка к нулю, среднее значение коэффициента детерминации (R^2) – 0.88.

4. Наиболее значимыми переменными (в порядке убывания индекса Джини) в дифференциации содержания гумуса в почвах ЛОД оказались плановая и кросс–секционная кривизны поверхности, значения абсолютных высот, крутизна склонов, относительные превышения в окрестности 100 м, топографический индекс влажности.

5. Наиболее значимыми переменными (в порядке убывания индекса Джини) в дифференциации величин значений pH водной и солевой вытяжек в почвах ЛОД оказались значения индекса относительных превышений в окрестности 100 м, профильной кривизны, крутизны склонов, топографического индекса влажности и расстояния до водотока.

Библиографический список

1. *Гречин И.П.* Почвы Лесной опытной дачи: Рукописный отчет / И.П. Гречин, Москва:, 1955. 80 с.

2. *Жоголев А.В.* Актуализация региональных почвенных карт на основе спутниковых и геоинформационных технологий (на примере Московской области): Автореф. дис. ... к. с.–х. н., 2016. 22 с.

3. Классификация и диагностика почв России Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

4. *Козлов Д.Н., Сорокина Н.П.* Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии под ред. А.Л. Иванов, Москва: Почвенный ин–т имени В.В. Докучаева, 2012. 35–57 с.

5. *Мешалкина Ю.Л.* Что такое «цифровая почвенная картография»? (обзор) под ред. А.Л. Иванов, Москва: Почвенный ин–т имени В.В. Докучаева, 2012. 9–19 с.

6. Наумов В.Д. География почв / В.Д. Наумов, Москва: Изд–во РГАУ–МСХА, 2016. 364 с.

7. *Наумов В.Д., Поляков А.Н.* 150 лет Лесной опытной даче РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева / Москва: Изд–во РГАУ–МСХА, 2015. 344 с.

8. *Савин И.Ю.* Компьютерная имитация картографирования почв под ред. А.Л. Иванов, Москва: Почвенный ин–т имени В.В. Докучаева, 2012. 26–35 с.

9. *Флоринский И.В.* Гипотеза Докучаева – центральная идея цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125–летию публикации) под ред. А.Л. Иванов, Москва: Почвенный ин–т имени В.В. Докучаева, 2012. 19–29 с.

10. *Флоринский И.В.* Иллюстрированное введение в геоморфометрию // Альманах «Пространство и время». 2016. № 1 (11). С. 20.

11. *Чистяков С.П.* Случайные леса: обзор // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 1. С. 117–136.

12. *Arrouays D. (Dominique).* GlobalSoilMap : basis of the global spatial soil information system / D. (Dominique) Arrouays, N. McKenzie, J. Hempel, A. Richer de Forges, A.B. McBratney, CRC Press/Balkema, 2014. 494 с.

13. *Breiman L.* Random Forests // Machine Learning. 2001. № 1 (45). С. 5–32.

14. *Conrad O.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. № 7 (8). С. 1991–2007.

15. FAO World reference base for soil resources 2006: a framework for international classification, correlation and communication / FAO, 2006. 145 с.

16. *Grunwald S.* Multi–criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches // Geoderma. 2009. № 3–4 (152). С. 195–207.

17. *Hengl T.* Pedometric mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches: diss 2003.

18. *Hengl T.* SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping // PLoS ONE. 2014. № 8 (9). С. e105992.

19. *Hengl T.* Mapping Soil Properties of Africa at 250 m Resolution: Random Forests Significantly Improve Current Predictions // PLOS ONE. 2015. № 6 (10). C. e0125814.

20. *Hengl T.* SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning // PLOS ONE. 2017. № 2 (12). C. e0169748.

21. *McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B.* On digital soil mapping // Geoderma. 2003. № 1–2 (117). C. 3–52.

22. *Minasny B., McBratney A.B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. (264). C. 301–311.

23. *Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J.* Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model // Geoderma. 1994. № 3–4 (63). C. 197–214.

24. *Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J.* Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression–kriging // Geoderma. 1995. № 3–4 (67). C. 215–226.

25. R Core Development Team R: A language and environment for statistical computing // 2016.

26. *Zhu A.X.X.* Soil Mapping Using GIS, Expert Knowledge, and Fuzzy Logic // Soil Sci Soc Am J. 2001. № 5 (65). C. 1463–1472.

DIGITAL MAPPING OF SOIL PROPERTIES BY USING REGRESSION KRIGING: THE CASE OF RSAU–MTAA FOREST EXPERIMENTAL DISTRICT

A.V. Chinilin, V.D. Naumov, V.S. Mikhaltsov

(Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy)

In recent years, there has been an increasing interest in hybrid interpolation techniques, which can give better predictions than either single approach. One of these hybrid interpolation techniques is known as regression kriging. It first uses regression on auxiliary information and then uses simple kriging to interpolate the residuals from the regression model. This paper describes the development of digital mapping based on regressive kriging as exemplified by RSAU–MTAA Forest Experimental District. The methodology resolving into a spatial prediction of soil properties (soil organic matter (%), pH in H2O and in KCL) by using regression kriging. The spatial interpolation was based on the 87 sampling points and a set of covariates represented by digital elevation model and its derivatives. As a result, maps of the considered soil properties have been made and the influence of the relief characteristics on the spatial differentiation of soil properties has been analyzed. The results of 10–fold cross–validation show that the model obtained for soil organic matter explains 88% of the variance (RMSE 0.34), model for pH in H_2O explains 89% of the variance (RMSE 0.25) model for pH in KCl – also 89% of the variance (RMSE 0.31). Spatial distribution modeling of soil properties shows that relief has a significant influence on the soil cover. The most significant environmental variables in distribution of soil organic matter is plan and cross–sectional curvatures, slope, topographic position index (within the area of 100 m) and topographic wetness index.

Key words: *digital soil mapping, spatial interpolation, soil–landscape relationships, random forest, GSIF.*

References

1. *Grechin I.P.* Pochvy Lesnoy opytnoy dachi: Rukopisnyy otchet [Soil of the Forest Experimental District: Handwritten report] / I.P. Grechin, Moskva:, 1955. 80 p.

2. *Zhogolev A.V.* Aktualizatsiya regional'nykh pochvennykh kart na osnove sputnikovykh i geoinformatsionnykh tekhnologiy (na primere Moskovskoy oblasti): Avtoref. dis. ... k. s.–kh. n. [Updating of regional soil maps on the basis of satellite and geoinformation technologies (as exemplified by the Moscow region): Self-review of PhD (Ag) thesis], 2016. 22 p.

3. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils in Russia] / Smolensk: Oykumena, 2004. 342 p.

4. *Kozlov D.N., Sorokina N.P.* Traditsii i innovatsii v krupnomasshtabnoy pochvennoy kartografii [Traditions and innovations in large-scale soil mapping]. Ed. by A.L. Ivanov, Moskva: Pochvennyy in–t imeni V.V. Dokuchayeva, 2012. Pp. 35–57.

5. *Meshalkina Yu.L.* Chto takoye "tsifrovaya pochvennaya kartografiya"? (obzor) [What is digital soil mapping? (review)] Ed. by A.L. Ivanov, Moskva: Pochvennyy in–t imeni V.V. Dokuchayeva, 2012. Pp. 9–19.

6. *Naumov V.D.* Geografiya pochv [Soil geography] / V.D. Naumov, Moskva: Izd–vo RGAU–MSKHA, 2016. 364 p.

7. *Naumov V.D., Polyakov A.N.* 150 let Lesnoy opytnoy dache RGAU–MSKHA imeni K.A. Timiryazeva [150 years of RSAU-MTAA Forest Experimental District] / Moskva: Izd–vo RGAU–MSKHA, 2015. 344 p.

8. *Savin I.Yu.* Komp'yuternaya imitatsiya kartografirovaniya pochv [Computer simulation of soil mapping] Ed. by A.L. Ivanov, Moskva: Pochvennyy in–t imeni V.V. Dokuchayeva, 2012. Pp. 26–35.

9. *Florinskiy I.V.* Gipoteza Dokuchayeva – tsentral'naya ideya tsifrovogo prognoznogo pochvennogo kartografirovaniya (k 125–letiyu publikatsii) [The Dokuchaev hypothesis is the central idea of digital forecasted soil mapping (to the 125th anniversary of the publication)] / Ed. by A.L. Ivanov, Moskva: Pochvennyy in–t imeni V.V. Dokuchayeva, 2012. Pp. 19–29.

10. *Florinskiy I.V.* Illyustrirovannoye vvedeniye v geomorfometriyu [Illustrated introduction to geomorphometry] // Al'manakh "Prostranstvo i vremya". 2016. No. 1 (11). Pp. 20.

11. *Chistyakov S.P.* Sluchaynyye lesa: obzor [Random forests: a review] // Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2013. No. 1. Pp. 117–136.

12. *Arrouays D. (Dominique).* GlobalSoilMap : basis of the global spatial soil information system / D. (Dominique) Arrouays, N. McKenzie, J. Hempel, A. Richer de Forges, A.B. McBratney, CRC Press/Balkema, 2014. 494 p.

13. *Breiman L.* Random Forests // Machine Learning. 2001. No. 1 (45). Pp. 5–32.

14. *Conrad O.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. No. 7 (8). Pp. 1991–2007.

15. FAO World reference base for soil resources 2006: a framework for international classification, correlation and communication / FAO, 2006. 145 p.

16. *Grunwald S.* Multi–criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches // Geoderma. 2009. No. 3–4 (152). Pp. 195–207.

17. *Hengl T.* Pedometric mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches: diss 2003.

18. *Hengl T.* SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping // PLoS ONE. 2014. No. 8 (9). Pp. e105992.

19. *Hengl T.* Mapping Soil Properties of Africa at 250 m Resolution: Random Forests

Significantly Improve Current Predictions // PLOS ONE. 2015. No. 6 (10). C. e0125814.

20. *Hengl T.* SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning // PLOS ONE. 2017. No. 2 (12). Pp. e0169748.

21. *McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B.* On digital soil mapping // Geoderma. 2003. No. 1–2 (117). Pp. 3–52.

22. *Minasny B., McBratney A.B.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. (264). Pp. 301–311.

23. *Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J.* Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model // Geoderma. 1994. No. 3–4 (63). Pp. 197–214.

24. *Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J.* Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression kriging // Geoderma. 1995. No. 3–4 (67). C. 215–226.

25. R Core Development Team R: A language and environment for statistical computing // 2016.

26. *Zhu A.X.X.* Soil Mapping Using GIS, Expert Knowledge, and Fuzzy Logic // Soil Sci Soc Am J. 2001. No. 5 (65). Pp. 1463–1472.

Чинилин Андрей Владимирович – асп., асс. кафедры почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: (499) 976–08–97; email: achinilin@rgau–msha.ru).

Наумов Владимир Дмитриевич – д. б. н., проф., зав. кафедрой почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: (499) 976–08–97; email: naumovsol@timacad.ru).

Михальцов Всеволод Сергеевич – студ. 3-го курса бакалавриата кафедры почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: (499) 976–08–97; email: vmikhaltsov@gmail.com).

Andrey V. Chinilin – postgraduate student, Assistant Professor, the Department of Soil Science, Geology and Landscape Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127550, phone: (499) 976-08-97; e-mail: achinilin@rgau-msha.ru).

Vladimir D. Naumov – DSc (Bio), Professor, Head of the Department of Soil Science, Geology and Landscape Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127550, phone: (499) 976-08-97; e-mail: naumovsol@timacad.ru).

Vsevolod S. Mikhaltsov – third-year BSc student, the Department of Soil Science, Geology and Landscape Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Moscow; phone: (499) 976-08-97; e-mail: vmikhaltsov@gmail.com).