

ГЕОГРАФИЯ И ГЕНЕЗИС ПОЧВ

УДК 631.4

К.В. Вяткин^{1,2}, Ю.В. Залавский¹, О.Н. Бигун¹, В.В. Лебедь¹, А.И. Шерстюк¹,
И.В. Плиско¹, С.Г. Накисько¹

**СОЗДАНИЕ НАЦИОНАЛЬНОЙ КАРТЫ ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В
ПОЧВАХ УКРАИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ ПОЧВЕННОГО
КАРТОГРАФИРОВАНИЯ**

¹Национальный научный центр «Институт почвоведения и агрохимии имени
А. Н. Соколовского», 61024, г. Харьков, ул. Чайковская, 4, Украина;

²Секретариат Глобального почвенного партнерства, Продовольственная и
сельскохозяйственная организация ООН, Виале делле Терме ди Каракалла, 00153
Рим, Италия, e-mail: oksana_bigun@ukr.net

Аннотация. На основе информации о содержании в почвах Украины органического углерода, а также архивных почвенных карт, материалов дистанционного зондирования, дополнительных атрибутивных характеристик почвенных и климатических показателей с использованием технологий цифрового моделирования и картографирования почв была создана национальная карта запасов почвенного органического углерода в слое 0-30 см с разрешением 1x1 км. Моделирование пространственного распределения запасов органического углерода в минеральных почвах было выполнено с использованием алгоритма Random Forest, в торфяниках – методом кригинга. Национальная карта запасов органического углерода в почвах Украины была разработана в соответствии со спецификациями Продовольственной и сельскохозяйственной Организации Объединенных Наций (ФАО) и интегрирована в Глобальную карту почвенного органического углерода ФАО (GSOCmap).

Ключевые слова: цифровое почвенное картографирование, почвенный органический углерод, почвенный покров Украины, Глобальное почвенное партнерство, GSOCmap.

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный органический углерод (ПОУ) является одним из важнейших компонентов почвы и влияет на большинство почвенных процессов, имеющих отношение к производству продуктов питания [1]. Также общеизвестна роль почв и почвенного органического углерода в обеспечении устойчивости сельскохозяйственных систем к изменению климата, поэтому ПОУ включен как мониторинговый показатель в пункт 15.3.1 Целей устойчивого развития (ЦУР) глобального договора Организации Объединенных Наций (ООН), в соответствии с которым величина запасов углерода в почве является одним из трех суб-индикаторов для определения доли деградированного земельного участка, относительно всего земельного участка [2].

Несмотря на внимание, которое уделяется роли ПОУ в обеспечении про-

дольственной безопасности и смягчении последствий изменения климата, знания об исходных условиях и изменениях ПОУ в почвах на глобальном уровне по-прежнему довольно ограничены. Существующие глобальные оценки запасов ПОУ выполнены с использованием различных методологий и подходов, именно поэтому отмечается высокая изменчивость величин запасов органического углерода в почвах среди авторов [3].

Согласно Докладу о состоянии почвенных ресурсов мира [4], в настоящее время около 33 % всех мировых почв деградировано, что означает значительную потерю органического углерода почвы во всем мире. Это создает необходимость оценки и мониторинга запасов ПОУ и его пространственного распределения на глобальном, национальном и региональном уровнях.

В ходе 5-й сессии Межправительственной технической группы по почвам (МТГП) Глобального почвенного партнерства (ГПП) Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), которая состоялась в марте 2016 года, в рамках сотрудничества МТГП и научно-консультативным органом Конвенции Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием (КООНБО), Межправительственной научно-политической платформой по биоразнообразию и экосистемным услугам (МПБЭУ) и Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), было принято решение о создании Глобальной карты запасов почвенного органического углерода ФАО [3]. Создание Глобальной карты ФАО основано на распределенном подходе, т.е. каждая страна создает свою собственную национальную карту в соответствии с методологией ГПП, т.е. каждая страна создает свою собственную национальную карту в соответствии с методологией ГПП, используя доступные локальные почвенные данные и знания. Глобальная карта запасов почвенного органического углерода, интегрированная из национальных пространственных оценок, станет информационной основой (как на глобальном, так и национальном уровнях) для мониторинга состояния почвы, выявления деградированных районов, установления целевых показателей восстановления, изучения возможностей секвестрации CO₂, поддержки отчетности по выбросам парниковых газов в рамках Рамочной конвенцией ООН об изменении климата (РКИК ООН) и принятия обоснованных решений для смягчения последствий изменения климата и адаптации к нему. Украина, как постоянный член ГПП, Европейского регионального почвенного партнерства также приняла участие в этом глобальном процессе,

создав национальную карту запасов органического углерода в почвах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Национальная карта запасов органического углерода в почвах Украины выполнена с учетом всех спецификаций ГПП изложенных в руководствах, разработанных Межправительственной технической группой по почвам ГПП [3, 5], она создана на основе результатов измерений показателей содержания почвенного органического углерода полевых обследований почвенного покрова Украины с использованием цифровых методов картографирования.

Исходными данными для расчета запасов органического углерода в почвах послужили следующие источники информации:

– База данных (БД) «Свойства почв Украины» [6]. Реляционная БД «Свойства почв Украины» создана в лаборатории геоэкофизики почв Национального научного центра «Институт почвоведения и агрохимии имени А.Н. Соколовского (ННЦ «ИПА имени А. Н. Соколовского»), состоит из 9 электронных таблиц, содержащих информацию о профильном распределении свойств почв (около 250 показателей) из более, чем 2000 почвенных разрезов. Основные источники информации данной БД – это, преимущественно, материалы крупномасштабного почвенного обследования Украины 1957-1961 гг., полевые исследования почвенного покрова научных лабораторий ННЦ «ИПА имени А.Н. Соколовского», личные архивы исследователей почвоведов из различных научных учреждений. Из БД отобрано 1121 почвенных профиля, содержащих необходимые характеристики для расчета запасов ПОУ (рисунок 1).

– База данных полевых измерений содержания органического углерода в почвах Украины для слоя 0-30 см

создана при участии более 100 авторов из 14 различных научных учреждений Украины. БД содержит информацию о 3258 почвенных профилях (рисунок 1), а

также 169 профиля, которые содержат архивные данные о полевых исследованиях торфяников.



Рисунок 1 – Пространственное распределение данных использованных в анализе: БД 1 – база данных «Свойства почв Украины» (интервал исследований 1957-2012 гг.); БД 2 – база данных полевых измерений содержания ПОУ научных учреждений Украины (интервал исследований 1980-2016 гг.)

Источники данных для составления БД и национальной карты запасов ПОУ это - результаты, соответствующих измерений в образцах почвы, включая керны проб или образцы почвенных профилей. Используя материалы баз данных, были рассчитаны запасы органического углерода в каждом почвенном профиле или точке отбора почвенного образца по следующему уравнению [3]:

$$SOC = d * BD * C * CFst, \quad (1)$$

где: SOC – запасы почвенного углерода для слоя почвы, кг/м²; C – содержание органического углерода, г/г; d – мощность слоя почвы, м; BD – плотность сложения почвы, кг/м³; CFst – коэффициент коррекции на каменистость.

Для образцов почв в которых плотность сложения не определялась в

поле, данный показатель был рассчитан с помощью педотрансферной функции [7]; для некоторых типов почв параметры плотности сложения были взяты из литературных источников [8, 9]. Запасы и содержание почвенного углерода определялись для слоя почвы 0-30 см; расчет запасов органического углерода в торфяниках для слоя 0-30 см проводился с использованием базового значения плотности сложения 0,174 г/м³ [5, 10].

В соответствии с методологией цифрового картографирования почв [11] были созданы так называемые растры "ковариаты окружающей среды". Моделирование почвенных свойств в цифровой картографии основывается на взаимосвязях между почвами, факторами и процессами почвообразования (так называемой

S.C.O.R.P.A.N-модели), которые входят в уравнения в качестве переменных-предикторов [11]. Уравнение включает в себя следующие переменные: почва, климат, живые организмы и растительный покров, рельеф, материнская порода, фактор времени, пространственную и географическую позиции. Чтобы включить эти параметры в модель, был создан набор растров путем оцифровки почвенной карты, обработки спутниковых изображений и данных о рельефе.

Для получения характеристик почв и почвенных контуров была оцифрована почвенная карта Украины масштаба 1:750000. Оригинальная карта была издана ННЦ «ИПА имени А.Н. Соколовского» под редакцией профессора Н.К. Крупского в 1975 году, основана на данных крупномасштабного почвенного обследования 1957-1961 гг. Карта содержит 7026 полигонов и каждый из них включает в себя следующие атрибуты: тип и подтип почвы (до 3 типов и подтипов для каждого полигона), гранулометрический состав, материнская порода (до 2 типов для каждого полигона), тип оглеения, тип засоления, а также каменистость почв.

Для установления абсолютных высот дневной поверхности были выбраны ячейки матрицы высот Глобальной модели рельефа (GMTED2010) Геологической службы США и Американского национального агентства геопространственной разведки. На основе этой цифровой модели рельефа были получены параметры рельефа с помощью программного обеспечения SAGA GIS 3.0 [12], включающие следующие характеристики: уклон, продольная кривизна, кривизна поперечного сечения рельефа, индекс топографической увлажненности, экспозиция склонов, закрытые понижения рельефа, топографический индекс [13].

Характеристики растительного покрова территории основывались на данных дистанционного зондирования

Европейского Космического Агентства с разрешением 300 м. По типам растительности было выделено 8 категорий: пашня, луга и кустарники, широколиственные леса, хвойные леса, смешанные леса, антропогенные (техногенные) территории, территории с открытым грунтом, водные объекты. Водные объекты и антропогенные (техногенные) территории не учитывались при создании карты органического углерода.

В качестве спутниковых данных были использованы снимки спектральных сенсоров MODIS, а именно два продукта:

- MOD13Q1: MODIS / Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m Grid SIN V006 [14] - для мозаики растров в ближнем инфракрасном диапазоне (ИК-диапазоне), растров вегетационных индексов NDVI (нормализованный относительный индекс растительности) и EVI (улучшенный вегетационный индекс);

- MOD17A3H: MODIS / Terra Net Primary Production Yearly L4 Global 500 m SIN Grid V006 [15] - для растра первичной продуктивности.

Предыдущие исследования показали, что ближний ИК-диапазон непокрытой почвы имеет большую зависимость от содержания органического углерода в почве [16]. Для наблюдения за непокрытой растительностью почвой был избран апрель, для составления мозаики растров использовались изображения за 5 лет, а именно с 2012 по 2016 гг. Учитывая особенности использованных данных MOD13Q1 всего было отобрано 40 изображений для территории Украины. Процедура создания растра ближнего ИК-диапазона для непокрытой почвы включала в себя несколько этапов, выполненных с использованием языка программирования R [17].

Для моделирования влияния растительности на органический углерод в почве, были рассчитаны средние зна-

чения вегетационных индексов NDVI и EVI за март-октябрь 2012-2016 гг. (всего 300 изображений), с учетом надежности каждого изображения. Кроме того, с использованием MOD17A3H, был рассчитан слой данных средней первичной продуктивности растительности в течение 15 лет с 2000 по 2014 гг.

Согласно исследованиям [18] одним из ключевых климатических факторов, определяющим характеристики почвы Украины, является гидротермический коэффициент (ГТК), который представляет собой отношение количества осадков (R) в мм в период со средней температурой воздуха выше 10°C к сумме температур (Σt) умноженные на 10:

$$\text{ГТК} = R \cdot 10 / \Sigma t \quad (2)$$

Для оценки этого параметра были собраны данные 137 метеорологических станций по всей Украине, а среднегодовые значения за 100 лет наблюдений (1890-1990 гг.) были рассчитаны для осадков в течение года, осадков в теплый период (май-сентябрь), суммы температур в теплый период (май-сентябрь). Из этих значений рассчитывался ГТК для каждой метеостанции. Затем были созданы растровые слои для осадков, температуры и ГТК путем интерполяции значений точек методом обратно взвешенных расстояний.

Дополнительно были загружены растры Глобального центра климатических данных [19] с разрешением 1x1 км по средней месячной температуре и осадкам за 1960-1990 гг. Для создания результирующих растров были использованы слои температур и осадков за теплый и холодный периоды года и ГТК.

В качестве дополнительных ковариат (независимых переменных) для моделирования были загружены 48 растров, предоставленных экспертами Международного центра почвенной информации (ISRIC).

Пространственное моделирование было выполнено с помощью языка программирования R [17] с использованием программного обеспечения Rstudio [20].

На начальном этапе, точечные данные (скомпилированные из двух БД в одну таблицу результаты полевых измерений органического углерода) были загружены в программу и протестированы для поиска дубликатов и отсутствующих значений. В результате 448 точки из 4379 были удалены как дубликаты.

Анализ распределения данных показал, что значение запасов органического углерода для минеральных и торфяных почв очень отличаются. Высокая концентрация ПОУ в торфяных почвах ярко контрастирует с более низкими концентрациями минеральных почв (таблица 1). В результате данные были разбиты на две группы: минеральные почвы и торфяные почвы, а также составлены отдельные модели для каждой группы. Разделение проводилось на основе типа почвы, указанного в базе данных. После корректировки 3792 точки были классифицированы как минеральные почвы, а 139 – как торфяники. После этого данные о минеральных и торфяных почвах были проанализированы отдельно.

Анализ гистограммы запасов ПОУ в минеральных почвах позволил выявить образцы с чрезвычайно высокими (аномальными) значениями, которые впоследствии были удалены из выборки. Затем, в точки с данными ПОУ извлекались значения из вспомогательных растров, создавая таким образом матрицу регрессии. В ситуации, когда тип почв, извлеченный из карты, не совпадал с соответствующим типом почвы, указанным в базе данных точек, – предпочтение отдавалось точечным данным из-за возможной неточности и обобщенного характера почвенной карты.

Таблица 1 – Запасы органического углерода в слое 0-30 см в основных типах почв Украины

Тип почвы	Средние запасы ПОУ, кг/м ²	Тип почвы	Средние запасы ПОУ, кг/м ²
Черноземы	8,3	Аллювиальные луговые	9,2
Оподзоленные	7,0	Аллювиальные дерновые	5,5
Лугово-степные	8,5	Дерново-карбонатные	8,6
Дерново-подзолистые	3,4	Каштановые	5,9
Серые лесные	4,5	Солонцы степные	5,3
Болотные	22,7	Солонцы луговые	5,9
Дерновые оглеенные	5,2	Подзолисто-буроземные поверхностнооглеенные	5,9
Дерново-подзолистые оглеенные	4,1	Аллювиальные лугово-болотные	9,0
Дерновые боровые	5,6	Солончаки	4,4
Луговые	9,2	Оподзоленные оглеенные	5,9
Серые лесные оглеенные	3,9	Лугово-болотные	8,0
Буроземные	7,9	Аллювиальные болотные	12,0
Примечание: Тип почвы указан согласно классификации почв Украины [21]			

Категориальные переменные в матрице: тип почвы, материнская порода и тип растительности были преобразованы из числового типа данных в факторный. Для пространственного моделирования распределения запасов органического углерода в минеральных почвах был использован алгоритм Random Forest [22]. Моделирование пространственного распределения запасов органического углерода для торфяных почв выполнено с использованием метода кригинга, поскольку существующий набор данных по торфяникам при использовании регрессионной модели показал очень низкую зависимость показателя запасов ПОУ от используемых в модели переменных. Далее, минеральные и торфяные почвы были объ-

единены воедино для создания итогового слоя моделирования запасов ПО, и для получения окончательного варианта карты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 отображены смоделированные значения запасов органического углерода в слое 0-30 см в почвах Украины с разрешением 1x1 км. Здесь четко просматриваются богатые углеродом черноземные почвы Лесостепи и Степи. Наименьшие же значения характерны для песчаных подзолистых почв зоны Украинского Полесья, а также засушливой зоны Сухой Степи на юге страны [23]. Также заметно влияние орографического фактора на пространственные распределения запасов ПОУ

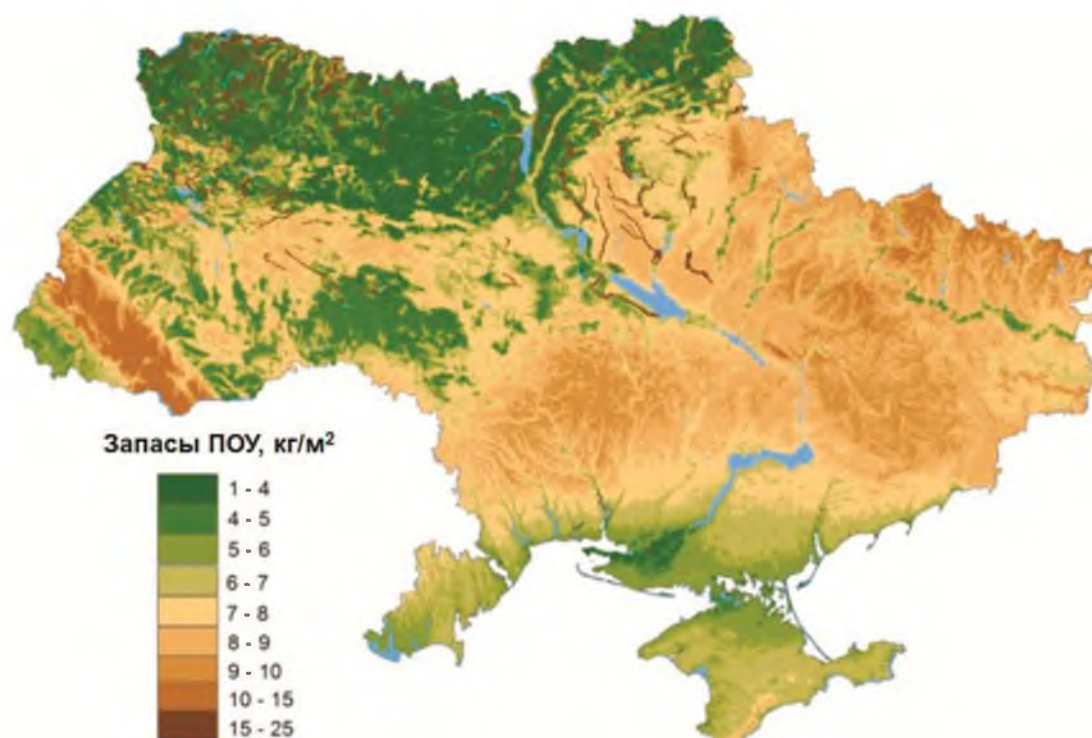


Рисунок 2 – Запасы органического углерода в почвах Украины (слой 0-30 см)

Неопределенность полученной модели была оценена с использованием таких параметров, как коэффициент детерминации (R^2) и среднеквадратичная ошибка модели (RMSE). Полученные в результате кросс-валидации зна-

чения $R^2 = 0,56$ и $RMSE = 1,82$ для минеральных почв, свидетельствуют о приемлемой точности модели. Анализ остатков показал их нормальное распределение, это доказывает то, что полученная модель не смещена (рисунок 3).

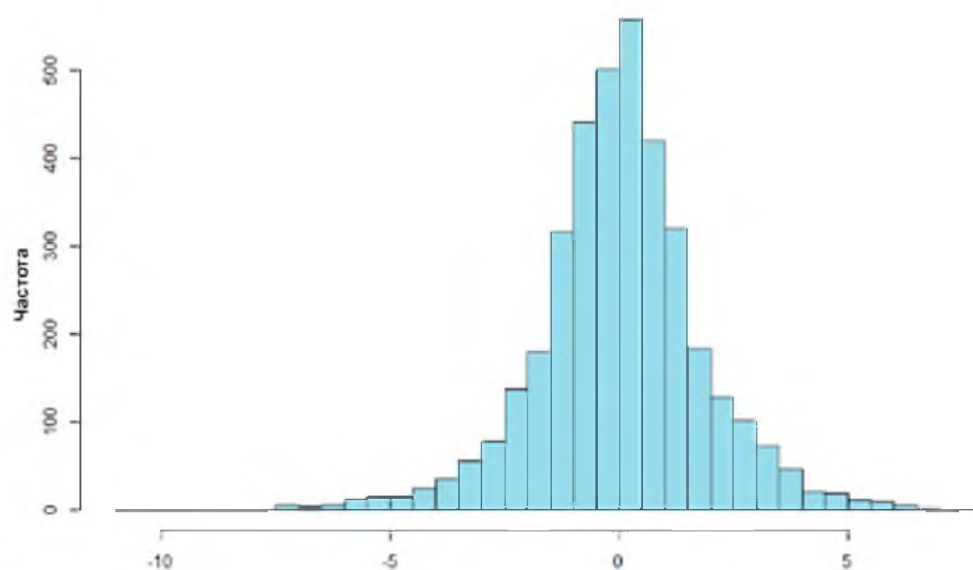


Рисунок 3 – Гистограмма распределения остатков полученной модели

Для оценки влияния предикторов модели на пространственное распределение запасов почвенного органического углерода использовались параметры IncMSE и IncNodePurity Random Forest (таблица 2). IncMSE – это увеличение среднеквадратичных ошибок параметров в результате перестановки

определенной переменной. IncNodePurity характеризует, насколько разбиение деревьев решений Random Forest (на основе определенного параметра) увеличивает "чистоту" узлов разбиения (разница средних квадратичных ошибок до и после разделения).

Таблица 2 – Наиболее значимые переменные при моделировании запасов почвенного органического углерода

Наиболее значимые переменные модели на основе статистических оценок:	
IncMSE	IncNodePurity
- тип почвы 4 (Дерново-подзолистые почвы); - тип почвы 5 (Серые лесные почвы); - сезонность температуры; - коэффициент отражения непокрытой почвы в ближнем ИК-диапазоне; - количество осадков в холодный период (Декабрь-Февраль)	- сезонность температуры; - коэффициент отражения непокрытой почвы в ближнем ИК-диапазоне; - тип почвы 4 (Дерново-подзолистые почвы); - ГТК; - тип почвы 1 (Чернозем)

Подводя итоги, можно сказать, что наиболее важными параметрами в модели являются: тип почвы, климат и коэффициент отражения открытой почвы в ближнем ИК-диапазоне.

Национальная карта почвенного органического углерода Украины была создана и интегрирована в Глобальную карту почвенного органического углерода ФАО – GSOCmap [24-25] при поддержке Секретариата Глобального Почвенного Партнерства наряду с вкладом других стран.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Национальная карта почвенного органического углерода Украины является вкладом Украины в глобальную карту запасов почвенного органического углерода (GSOCmap). Карта была создана с использованием современных технологий цифрового картографирования почв, с учетом спецификаций ГПП и является репрезентативной для пространственного распределения органического углерода в почвах Украины. Однако, следует отметить, что данная пространственная оценка основана

на наборе данных, 30 % из которых, получены в период до 1991 года. Это означает, что для установления базовой линии для мониторинга ПОУ в Украине необходимы дальнейшие исследования и дополнительные данные. Модель для запасов ПОУ в торфяных почвах имеет высокую неопределенность из-за недостаточного количества и качества данных. Для более точной оценки их нынешнего состояния требуется дополнительные полевые обследования этих почв.

Национальная карта запасов почвенного углерода Украины для слоя 0-30 см с разрешением 1x1 км разработана посредством инклюзивного процесса с участием 14 научных организаций Украины при поддержке Межправительственной технической группы по почвам, секретариата Глобального Почвенного Партнерства ФАО и Международного центра почвенной информации ISRIC. Более 100 ученых-почвоведов Украины поделились своими данными полевых обследований содержания и запасов органического

углерода в почвах, которые были объединены в единую БД и интегрированы в национальную и глобальную карты запасов ПОУ. Для дальнейшего использования таких карт для целей мониторинга содержания органического углерода в почвах и принятия обоснованных решений управления почвами и отслеживания воздействия этих мер, необходимо организовать непрерыв-

ный процесс обмена и обработки (в том числе и с помощью цифровых картографических процедур) актуальной почвенной информации между научными и государственными учреждениями Украины. Наиболее эффективным способом организации этого процесса было бы создание национальной информационной системы почв Украины.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем свою благодарность за финансовую и методологическую поддержку секретариату Глобального почвенного партнерства, а также экспертам Международного центра почвенной информации ISRIC за обучение по цифровому картированию почв и подготовку дополнительных ковариационных слоев, использованных для пространственного моделирования.

Также выражаем свою благодарность всем организациям и сотрудникам, принявшим участие в составлении БД натурных измерений содержания органического углерода в почвах Украины. Выражаем благодарность за предоставленные данные коллективам: научных подразделений ННЦ «ИПА имени А.Н. Соколовского», Полесской опытной станции ННЦ «ИПА имени А.Н. Соколовского», Национального научного центра «Институт земледелия Национальной академии наук Украины (НААНУ)», Черкасской государственной сельскохозяйственной опытной станции ННЦ «Институт земледелия НААНУ», Института риса НААНУ, Института сельскохозяйственной микробиологии и агропромышленного производства НААНУ, Института сельского хозяйства Карпатского региона НААНУ, Волынской государственной сельскохозяйственной опытной станции Института сельского хозяйства Западного Полесья, Кировоградской государственной сельскохозяйственной опытной станции НААНУ, Луганского института агропромышленного производства НААНУ, Научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации им. Г.Н. Высоцкого, Львовского национального университета имени Ивана Франко, Одесского национального университета имени И.И. Мечникова, Житомирского национального агроэкологического университета, Харьковского национального аграрного университета имени В.В. Докучаева, Львовского национального аграрного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Lal R. Soil health and carbon management [Electronic resource] // Food and Energy Security. – 2016. – Vol. 5, Issue 4. – P. 212-222. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/fes3.96>.
- 2 ФАО И ЦУР. Показатели: достижение результатов в выполнении Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – ФАО, 2017. – 40 с. – Режим доступа: <http://www.fao.org/3/a-i6919r.pdf>.
- 3 GSP Guidelines for sharing national data/information to compile a Global Soil Organic Carbon map (GSOC17) [Electronic resource]. – FAO, 2016. – 23 с. – Mode of access: <http://www.fao.org/3/a-bp164e.pdf>.
- 4 Status of the World's Soil Resources (SWSR). Main Report [Electronic resource]. – Rome, Italy: FAO and ITPS, 2015. – 650 p. – Mode of access: <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>.

5 Soil Organic Carbon Mapping Cookbook / ed. by Yu.Yigini, R. Baritz, Ronald R. Vargas. – 1st ed. – Rome, Italy: FAO and GSP, 2017. – 200 p.

6 Лактионова Т.Н., Медведев В.В., Савченко К.В., Бигун О.Н., Шейко С.Н., Накисько С.Г. База данных «Свойства почв Украины». Структура и порядок использования. – Изд. 2-ое – Харьков: ЦТ №1, 2012. – 150 с.

7 Медведев В.В., Пліско І.В., Бігун О.М. Досвід педотрансферного моделювання у дослідженнях фізики ґрунтів [Electronic resource] // Вісник аграрної науки. – 2015. – № 1. – С. 17 – 24. – Mode of access: http://agrovisnyk.com/pdf/ua_2015_01_02.pdf.

8 Медведев В.В., Лактионова Т.М., Пліско І.В., Бігун О.М., Шейко С.М., Накисько С.Г. Агрономічно орієнтоване районування земель за властивостями ґрунтів (обґрунтування, методи, приклади). – Харків: КП «Міська друкарня», 2012. – 100 с.

9 Трускавецький Р.С. Торфові ґрунти і торфовища України. – Харків: Міськдрук, 2010. – 278 с.

10 Agus F, Hairiah K, Mulyani A. Measuring carbon stock in peat soils: practical guidelines. – Bogor, Indonesia: World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia Regional Program, Indonesian Centre for Agricultural Land Resources Research and Development, 2011. – 60 p.

11 McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B. On digital soil mapping [Electronic resource] // Geoderma. – 2016. – Vol. 117, Issue 1–2. – P. 3–52. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).

12 Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., and Boehner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. // Geosci. Model Dev. – 2015. – Vol. 8, issue 7. – P. 1991–2007.

13 Guisan A., Weiss S.B., Weiss, A.D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution // Plant Ecology. – 1999. – Vol. 143, Issue 1. – P. 107–122.

14 Didan. K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC [Electronic resource]: Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). – 2015. – Mode of access: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>.

15 Running S. Mu. Q., Zhao M. MOD17A3H MODIS/Terra Net Primary Production Yearly L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC [Electronic resource]: Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). – 2015. – Mode of access: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3H.006>.

16 Трускавецький, С.Р. Використання багатоспектрального космічного сканування та геоінформаційних систем у дослідженні ґрунтового покриття Полісся : автореф. дис. канд. біол. наук (03.00.18) / С.Р. Трускавецький. – Харків: ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського», 2006. – 24 с.

17 The R Project for Statistical Computing [Electronic resource]: R-project. – 2017. – Mode of access: <https://www.r-project.org/>.

18 Полупан М.І., Соловей В.Б., Величко В.А. Класифікація ґрунтів України / За ред. М.І. Полупана. – К.: Аграрна наука, 2005. – 300 с.

19 Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G. and Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. – 2005. – Vol. 25, Issue 15. – P. 1965–1978.

20 RStudio Team. RStudio: Integrated Development for R. [Electronic resource]: RStudio, Inc., Boston, MA. – 2017. – Mode of access: <http://www.rstudio.com/>.

21 Почвы Украины и повышение их плодородия / под. Ред. Н.И. Полупана. – Киев: Урожай, 1988. – 293 с.

22 Breiman L. Random forests // Machine Learning – 2001. – Vol. 45, Issue 1. – P. 5–32.

23 Полупан М.І., Величко В.В., Соловей В.Б. Розвиток українського агрономічного ґрунтознавства: генетичні та виробничі аспекти / за ред. М.І. Полупана. – К.: Аграрна наука, 2015. – 400 с.

24 GLOSIS - GSOCmap V1.0 (BETA) [Electronic resource]: Food and Agriculture Organization of the United Nations. – 2017. – Mode of access: <http://54.229.242.119/apps/GSOCmap.html>.

25 Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report [Electronic resource]. – Rome, Italy: FAO and ITPS, 2018. –162 pp. – Mode of access: <http://www.fao.org/3/i8891en/i8891EN.pdf>.

REFERENCES

1 Lal R. Soil health and carbon management [Electronic resource] // Food and Energy Security. – 2016. – Vol. 5, Issue 4. – P. 212-222. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/fes3.96>.

2 FAO I TsUR. Pokazateli: dostizheniye rezultatov v vypolnenii Povestki dnya v oblasti ustoychivogo razvitiya na period do 2030 goda [Elektronnyy resurs]. – FAO, 2017. – 40 s. – Rezhim dostupa: <http://www.fao.org/3/a-i6919r.pdf>.

3 GSP Guidelines for sharing national data/information to compile a Global Soil Organic Carbon map (GSOC17) [Electronic resource]. – FAO, 2016. – 23 s. – Mode of access: <http://www.fao.org/3/a-bp164e.pdf>.

4 Status of the World's Soil Resources (SWSR). Main Report [Electronic resource]. – Rome, Italy: FAO and ITPS, 2015. – 650 p. – Mode of access: <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>.

5 Soil Organic Carbon Mapping Cookbook / ed. by Yu.Yigini, R. Baritz, Ronald R. Vargas. – 1st ed. – Rome, Italy: FAO and GSP, 2017. – 200 p.

6 Laktionova T.N., Medvedev V.V., Savchenko K.V., Bigun O.N., Sheyko S.N., Nakisko S.G. Baza dannykh «Svoystva pochv Ukrainy». Struktura i poryadok ispolzovaniya. – Izd. 2-oye – Kharkov: TsT №1, 2012. – 150 s.

7 Medvedev V.V., Plisko I.V., Bigun O.M Dosvid pedotransferного modelyuvannya u doslidzhennyakh fiziki rruntiv [Electronic resource] // Visnik agrarnoi nauki. – 2015. – № 1. – С. 17 – 24. – Mode of access: http://agrovisnyk.com/pdf/ua_2015_01_02.pdf.

8 Medvedev V.V., Laktionova T.M., Plisko I.V., Bigun O.M., Sheyko S.M., Nakisko S.G. Agronomichno orientovane rayonuvannya zemel za vlastivostyami rruntiv (obrruntuvannya, metodi, prikladi). – Kharkiv: KP «Miska drukarnya», 2012. – 100 s.

9 Truskavetsky R.S. Torfovi grunti i torfovishcha Ukraini. – Kharkiv: Miskdruk, 2010. – 278 s.

10 Agus F, Hairiah K, Mulyani A. Measuring carbon stock in peat soils: practical guidelines. – Bogor, Indonesia: World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia Regional Program, Indonesian Centre for Agricultural Land Resources Research and Development, 2011. – 60 p.

11 McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B. On digital soil mapping [Electronic resource] // Geoderma. – 2016. – Vol. 117, Issue 1–2. – P. 3-52. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).

12 Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., and Boehner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. // Geosci. Model Dev. – 2015. - Vol. 8, issue 7. – P. 1991-2007.

13 Guisan A., Weiss S.B., Weiss, A.D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution // Plant Ecology. – 1999. – Vol. 143, Issue 1. – P. 107-122.

14 Didan. K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC [Electronic resource]: Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). – 2015. – Mode of access: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>.

15 Running S. Mu. Q., Zhao M. MOD17A3H MODIS/Terra Net Primary Production Yearly L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC [Electronic resource]: Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). – 2015. – Mode of access: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3H.006>.

16 Truskavetsky, S.R. Viktoristannya bagatospektralnogo kosmichnogo skanuvannya ta geoinformatsiynikh sistem u doslidzhenni gruntovogo pokrivu Polissya : avtoref. dis. kand. biol. nauk (03.00.18) / S.R. Truskavetsky. – Kharkiv: NNTs «IGA imeni O.N. Sokolovskogo», 2006. – 24 s.

17 The R Project for Statistical Computing [Electronic resource]: R-project. – 2017. – Mode of access: <https://www.r-project.org/>.

18 Polupan M.I., Solovey V.B., Velichko V.A. Klasifikatsiya rruntiv Ukraïni / Za red. M.I. Polupana. – K.: Agrarna nauka, 2005. – 300 s.

19 Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G. and Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. – 2005. – Vol. 25, Issue15. – P. 1965-1978.

20 RStudio Team. RStudio: Integrated Development for R. [Electronic resource]: RStudio, Inc., Boston, MA . – 2017. – Mode of access: <http://www.rstudio.com/>.

21 Pochvy Ukrainy i povysheniye ikh plodorodiya / pod. Red. N.I. Polupana. – Kiyev: Urozhay, 1988. – 293 s.

22 Breiman L. Random forests // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, Issue 1. – P. 5–32.

23 Polupan M.I., Velichko V.V., Solovey V.B. Rozvitok ukraïnskogo agronomichnogo rruntoznastva: genetichni ta virobnichi aspekti / za red. M.I. Polupana. – K.: Agrarna nauka, 2015. – 400 s.

24 GLOSIS - GSOCmap V1.0 (BETA) [Electronic resource]: Food and Agriculture Organization of the United Nations. – 2017. – Mode of access: <http://54.229.242.119/apps/GSOCmap.html>.

25 Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report [Electronic resource]. – Rome, Italy: FAO and ITPS, 2018. –162 pp. – Mode of access: <http://www.fao.org/3/i8891en/i8891EN.pdf>.

ТҮЙІН

К.В. Вяткин^{1,2}, Ю.В. Залавский¹, О.Н. Бигун¹, В.В. Лебедь¹, А.И. Шерстюк¹,
И.В. Плиско¹, С.Г. Накисько¹

ТОПЫРАҚТЫ КАРТОГРАФИЯЛАУДЫҢ ЦИФРЛЫҚ ӘДІСТЕМЕСІН ПАЙДАЛАНУ
АРҚЫЛЫ УКРАИНА ТОПЫРАҒЫНДАҒЫ ОРГАНИКАЛЫҚ КӨМІРТЕК ҚОРЫНЫҢ
ҰЛТТЫҚ ТОПЫРАҚ КАРТАСЫН ҚҰРАСТЫРУ

¹«А. Н. Соколовский атындағы топырақтану және агрохимия институты»
ұлттық ғылыми орталығы, 61024, Украина, Харьков қ. Чайковская, 4 көшесі;

²Ғаламдық топырақтық әріптестік хатшылығы, Біріккен Ұлттар
Ұйымының Азық-түлік және ауылшаруашылық ұйымы, Viale delle Terme di
Caracalla, 00153 Рим, Италия, e-mail: oksana_bigun@ukr.net

Украина аумағындағы органикалық көміртек құрамы туралы ақпараттың негізінде, сондай-ақ мұрағаттық топырақ карталары, қашықтықтан зондтау материалдары, цифрлық модельдеу технологияларын қолданумен топырақтың және

климаттық көрсеткіштердің қосымша сипаттамалары және топырақты картографиялау нәтижесінде 0-30 см қабатта 1x1 км рұқсатымен топырақ құрамындағы органикалық көміртек қоры көрсетілген ұлттық топырақ картасы құрастырылды. Минералды топырақтағы органикалық көміртек қорларының кеңістіктікте үлестірілуін модельдеуде Random Forest, ал шымтезектерде - кригинг алгоритмі қолданылды. Украина аумағында органикалық көміртек қорларының ұлттық топырақ картасы Біріккен Ұлттар Ұйымының Азық-түлік және ауылшаруашылық ұйымының техникалық ерекшеліктеріне сәйкес әзірленген және ФАО (GSOCmap) ғаламдық топырақ органикалық көміртек картасына кіргізілген.

Түйінді сөздер: цифрлық топырақ картасын жасау, топырақтағы органикалық көміртек, Украинаның топырақ жамылғысы, Ғаламдық Топырақ серіктестік, GSOCmap.

SUMMARY

K. Viatkin^{1,2}, Yu. Zalavskiy¹, O. Bihun¹, V. Lebed¹, O. Sherstiuk¹, I. Plisko¹, S. Nakisko¹

CREATION OF THE UKRAINIAN NATIONAL SOIL ORGANIC CARBON STOCKS MAP USING DIGITAL SOIL MAPPING METHODS

¹*National Research Center «Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky», 61024, Kharkiv, 4, Chaykovska St., Ukraine;*

²*Global Soil Partnership Secretariat, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy,*

e-mail: oksana_bigun@ukr.net

The national map of soil organic carbon stocks in the 0-30 cm layer in Ukraine with resolution of 1x1 km was created based on information on organic carbon content in soils of Ukraine, as well as archive soil maps, remote sensing materials, additional characteristics of soil and climate indicators using digital soil mapping technology. Modeling of the distribution of organic carbon stocks in mineral soils was carried out using the Random Forest algorithm, in the peat soils - the kriging method. The national map of organic carbon stocks in the soils of Ukraine was developed in accordance with the specifications of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and integrated into the Global Soil Organic Carbon Map of FAO (GSOCmap).

Key words: digital soil mapping, soil organic carbon, soil cover of Ukraine, Global Soil Partnership, GSOCmap.