

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-158-198



Ссылки для цитирования:

Смирнова М.А., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И., Заздравных Е.А., Козлов Д.Н. Цифровое картографирование степени эродированности почв с использованием моделей фактор – свойство и фактор – процесс – свойство (юг Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 158-198. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-158-198

Cite this article as:

Smirnova M.A., Zhidkin A.P., Lozbenev N.I., Zazdravnykh E.A., Kozlov D.N. Digital mapping of erosion degree of soils using the factor – property and factor – process – property models (the south of the Central Russian upland), Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 104, pp. 158-198, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-158-198

Благодарность:

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-35-20011) и в рамках темы госзадания № 0591-2020-0029.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (scientific project No. 18-35-20011) and within the framework of the theme of state assignment No. 0591-2020-0029.

Цифровое картографирование степени эродированности почв с использованием моделей фактор – свойство и фактор – процесс – свойство (юг Среднерусской возвышенности)

© 2020 г. М. А. Смирнова^{1,2*}, А. П. Жидкин^{1**},
Н. И. Лозбенев^{1***}, Е. А. Заздравных³, Д. Н. Козлов^{1****}

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

* <https://orcid.org/0000-0002-5256-4348>, e-mail: summerija@yandex.ru,

** <https://orcid.org/0000-0003-3995-9203>,

*** <https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>,

**** <https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1.

³«ЦАС “Белгородский”», Россия,
308027, Белгород, ул. Щорса, д. 8.

*Поступила в редакцию 21.09.2020, после доработки 23.10.2020,
принята к публикации 11.11.2020*

Резюме: Деградация почв в результате водной эрозии представляет серьезную угрозу продовольственной и экологической безопасности, вследствие чего вопросы изучения и картографирования эрозии почв не теряют своей актуальности. В работе приведены результаты крупномасштабного цифрового картографирования степени эродированности почвенного покрова пашни Прохоровского района Белгородской области (85 тыс га), выполненного на основании подходов, связывающих факторы эрозионно-аккумулятивных процессов и степень эродированности почв напрямую (модель фактор – свойство), и посредством имитационной эрозионной модели WaTEM/SEDEM (модель фактор – процесс – свойство). Включение процессной составляющей в алгоритм цифрового почвенного картографирования позволило учесть не только пространственные, но и временные особенности протекания эрозионных процессов. Выявлено, что распашка земель Прохоровского района в первую очередь проводилась на землях, слабо подверженных эрозии, с темпами эрозии почти в два раза ниже, чем на более молодых пашнях. В результате этого карты эродированности почв, построенные на основе модели фактор – процесс – свойство с учетом и без учета длительности распашки в значительной степени соответствуют друг другу. Карты доминантных почвенных категорий (пиксел карты соответствует одной категории почв – незэродированной и слабоэродированной, средне-, сильноэродированной), построенные с использованием моделей фактор – свойство и фактор – процесс – свойство, обладают высокой степенью соответствия друг другу (идентичность предсказания для 90% пикселей), в то время как карты комбинаций почв (пиксел карты содержит информацию о долевом участии почв разной степени эродированности) различаются в большей мере (идентичность менее чем для 60% пикселей). Площади зональных, эрозионно-зональных и слабоэродированных комбинаций почв отличаются в 1.5–2 раза в сторону большей степени эродированности почв на картах, построенных с использованием модели фактор – процесс – свойство.

Ключевые слова: эрозионное моделирование, черноземы, Белгородская область, WATEM/SEDEM, структура почвенного покрова.

Digital mapping of erosion degree of soils using the factor – property and factor – process – property models (the south of the Central Russian upland)

M. A. Smirnova^{1,2*}, A. P. Zhidkin^{1**}, N. I. Lozbenev^{1***},
E. A. Zazdravnykh³, D. N. Kozlov^{1****}

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0002-5256-4348>, e-mail: summerija@yandex.ru,

**<https://orcid.org/0000-0003-3995-9203>,

***<https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>,

****<https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>.

²Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.

³“Agrochemical Service Center “Belgorodskiy”,
8 Shchorsa Str., Belgorod 308027, Russian Federation.

Received 21.09.2020, Revised 23.10.2020, Accepted 11.11.2020

Abstract: Soil degradation resulting from water erosion poses a serious threat to food and environmental security, therefore the research of soil erosion features and soil erosion mapping do not lose their relevance. The paper presents the results of large-scale digital mapping of the erosion degree of the arable soils in the Prokhorovsky district of the Belgorod region (85 thousand hectares), based on two approaches: (1) linking the factors of erosion-accumulative processes and the erosion degree of soil directly (factor – property model), and (2) due to imitation erosion model WaTEM/SEDEM (factor – process – property model). The inclusion of the process component into the digital soil mapping algorithm allows taking into account not only the spatial but also the temporal soil erosion features. It was revealed that the agricultural development of the Prokhorovsky district was primarily carried out on lands that are weakly prone to erosion, with the rate of erosion almost two times lower than on younger arable lands. As a result, the soil erosion maps, based on the factor – process – property model, with and without taking into account the duration of agricultural use, largely correspond to each other. Dominant soil categories (the map pixel corresponds to one soil taxa – non-eroded and slightly eroded, medium, highly eroded), mapping by factor –

property and factor – process – property models, have a high degree of correspondence to each other (prediction identity for 90% of pixels), while the soil combinations (the map pixel has information on the proportion of soils with different erosion degrees of soil) more significant (identity for less than 60% of pixels). The areas of zonal, erosion-zonal, and weakly eroded soil combinations differ 1.5–2 times, in the direction of a greater degree of soil erosion on the factor – process – property map.

Keywords: erosion modeling, Chernozems, Belgorod region, WATEM/SEDEM, soil cover pattern.

ВВЕДЕНИЕ

Эрозия почв представляет угрозу для почвенного покрова, продовольственной безопасности и состояния поверхностных вод, что признается всем мировым сообществом и отражено в целом ряде документов различного уровня – от региональных ([Agricultural..., 2004](#); [Государственный..., 2019](#)) до межгосударственных ([Thematic Strategy..., 2006](#); [Decision..., 2012](#); [Transforming..., 2015](#)). В основе современных оценок, программ по управлению и контролю эрозии почв лежат специальные карты, поскольку для принятия решений недостаточно знать количественные показатели эрозии почв, важно обладать информацией о пространственных особенностях протекания процесса и состоянии почвенного покрова ([Bui et al., 2011](#); [Guerra et al., 2015](#); [Alewell et al., 2019](#)). Все это вместе обуславливает большой интерес к проблеме картографирования эрозии почв ([Dotterweich, 2013](#); [Vanwalleghe et al., 2017](#)).

Существующие работы по картографированию эрозии почв можно разделить на две группы. В первой – пространственному отображению подвергаются особенности протекания эрозионно-аккумулятивных (ЭА) процессов путем построения карт темпов, объемов суммарных эрозионных потерь и т. д. ([Flanagan, 2004](#); [Guerra et al., 2014](#); [Alewell et al., 2019](#)). Во второй группе работ картографируются свойства почв – мощность гумусового горизонта, степень эродированности почв и т. д. ([Chaplot et al., 2010](#)). При этом в крайне редких случаях проводится сопряженный анализ пространственных особенностей протекания ЭА процессов и степени эродированности почвенного покрова одновременно

([Martinez-Mena et al., 2020](#)). В настоящее время все большую популярность приобретают методы цифрового картографирования степени эродированности почв и интенсивности протекания ЭА процессов в сравнении с визуально-экспертным методом в силу их большей дешевизны и производительности ([Minasny, McBratney, 2016](#); [Alewell et al., 2019](#); [Arrouays et al., 2020](#)).

Цифровое картографирование почв основано на установлении связей между факторами почвообразования и почвами, выраженными в виде численных моделей. Наиболее часто используемая модель SCORPAN ([McBratney et al., 2003](#); [Minasny, McBratney, 2016](#); [Ma et al., 2019](#)) является математическим выражением формулы Докучаева (1883): факторы почвообразования – почвы. Несмотря на то, что в теоретическом почвоведении давно показано преимущество использования подхода фактор – процесс – свойство над подходом фактор – свойство, использование моделей, включающих параметры процесса в алгоритмы цифрового почвенного картографирования, до сих пор единично и представлено в некоторых работах ([Angelini et al., 2016, 2017, 2018](#); [Ma et al., 2019](#); [Козлов и др., 2019](#)). Сложность включения процессной составляющей в алгоритмы цифрового почвенного картографирования заключается в том, что: (1) процессы сложно наблюдаемы, их прямое изучение вызывает определенные затруднения, прежде всего, инструментального характера ([Элементарные..., 1993](#)); (2) прямое изучение процессов реализуется, как правило, в условиях лабораторных экспериментов или на очень локальном уровне ([Карпачевский, Яшин, 1999](#); [Bockheim, Gennadiyev, 2009](#)); (3) различные процессы могут приводить к формированию одного и того же свойства (например, пониженное содержание органического углерода в почвах может являться результатом эрозии почв или дегумификации) ([Элементарные..., 1993](#); [Sommer et al., 2016](#); [Yaghibi et al., 2018](#)).

В работах ([Angelini et al., 2016, 2017, 2018](#)), посвященных внедрению структурных уравнений в алгоритмы почвенного картографирования, процессная составляющая не упоминается напрямую, однако указано, что моделируемые почвенные свойства (содержание органического углерода, илистой фракции, емкость катионного обмена) находятся в тесной взаимосвязи, реали-

зуемой в результате почвообразовательных процессов. В работе [Ma et al. \(2019\)](#) используется модель почвенно-ландшафтных связей SSSPAM (State Space Soil Production and Assessment Model) для предсказания пространственно-временной неоднородности содержания песчаной фракции в почвах.

В работе Д.Н. Козлова ([Козлов и др., 2019](#)) впервые показана возможность использования эрозионной модели для крупномасштабного картографирования степени эродированности почв на примере полигона, расположенного в Курской области. Настоящее исследование является продолжением цитируемой работы и направлено на развитие подходов цифрового почвенного картографирования степени эродированности почв, в частности учета продолжительности ЭА процессов в алгоритме картографирования. Такой учет необходим, поскольку степень эродированности почв на участках с разной продолжительностью распашки, как правило, существенно отличается. Например, в работе ([Жидкин и др., 2016](#)) на основе изучения ключевых участков в Белгородской области было показано, что на склонах со сходными физико-географическими условиями, но с разной длительностью распашки, объемы суммарных эрозионных потерь различались в 2–4 раза, несмотря на то, что среднеголетние темпы ЭА процессов были относительно стабильны.

Применение моделей, связывающих факторы ЭА процессов, пространственные, временные особенности их протекания и текущие свойства почв, может существенно усовершенствовать возможности оценки эродированности почвенного покрова и прогноза его трансформации в будущем. Помимо практической значимости, разрабатываемые подходы могут быть использованы для выявления особенностей структуры почвенного покрова, скорости и направленности трансформации его компонентов, а также устойчивости пространственной организации почвенного покрова к ЭА процессам. В этом смысле учет продолжительности ЭА процессов в алгоритмах картографирования имеет принципиально важную роль. В более широком понимании цифровое картографирование степени эродированности почв может быть использовано как инструмент для понимания структурно-функциональной организации почвенного покрова пахотных склонов. Целью исследо-

вания является разработка методических подходов к цифровому картографированию эродированности почвенного покрова. В задачи работы входило:

1. составление моделей фактор – свойство (ФС), фактор – процесс – свойство без учета длительности ЭА процессов (ФП_хС) и фактор – процесс – свойство с учетом длительности ЭА процессов (ФП_{х,t}С) для картографирования эродированности почвенного покрова всей пашни Прохоровского района Белгородской области (85 000 га);
2. картографирование доминантных почвенных категорий и комбинаций почв разной степени эродированности на основании моделей ФС, ФП_хС и ФП_{х,t}С.
3. сравнительный анализ карт доминантных почвенных категорий и карт комбинаций почв, полученных на основании моделей ФС, ФП_хС и ФП_{х,t}С.

Концептуальная схема исследования приведена на рисунке 1.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Физико-географическая характеристика

Район исследований расположен в южной части Среднерусской возвышенности. Климат умеренно континентальный с жарким летом и сравнительно холодной зимой, гидротермический коэффициент составляет около 1. Продолжительность теплого периода, по среднеголетним данным, равен 149 дням. По данным Старооскольской метеостанции за 2012–2016 гг., средняя температура января равна –6.8 °С, июня 19.3 °С. Среднегодовая температура воздуха составляет 6.6 °С, среднегодовое количество осадков – 558 мм ([Лукин, 2016](#)).

Рельеф представлен слабоволнистой возвышенной равниной с общим уклоном к югу и абсолютными высотами от 165 до 267 м. Преобладают платообразные междуречья с очень пологими склонами, как правило, менее 2°, редко 3–7°. Увеличение степени расчленения рельефа и крутизны склонов происходит при движении с севера на юг.

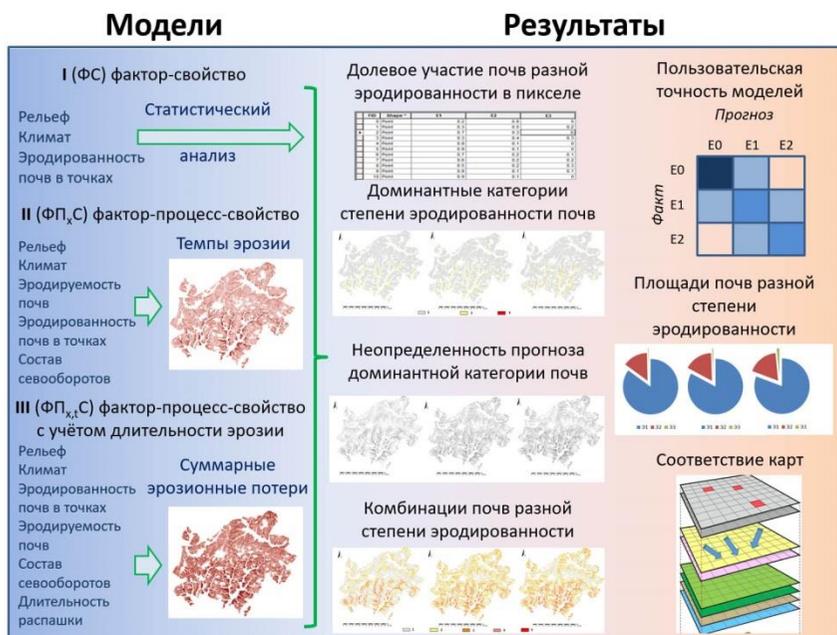


Рис. 1. Концептуальная схема исследования.
Fig. 1. Research design.

Многочисленные ложбины стока и карстово-меловые ландшафты встречаются преимущественно в восточной и юго-восточной части Прохоровского района. В качестве почвообразующих пород на территории исследования выступают лёссовидные суглинки. Почвенный покров пашни представлен в основном черноземами типичными (около 55% от площади пашни) и выщелоченными (около 40% от площади пашни), встречаются черноземы типичные карбонатные, черноземы солонцеватые, серые лесные, лугово-черноземные почвы (Лукин, 2016). Согласно данным почвенно-эрозионного районирования Белгородской области, (Соловиченко, Гютюнов, 2014) исследуемая территория относится к двум районам: западному эрозионному району слабого распространения смыва, слабой заовраженности, и к центральному эрозионному району среднего распространения смыва, средней заовраженности.

История землепользования исследуемой территории включает несколько этапов, в целом характерных для Центрального Черноземья ([Чендев, 2008](#)). Резкий рост интенсивности сельскохозяйственного освоения земель, сопровождаемый увеличением площади пашни, приходится на начало XVIII в. и середину XIX в. В XVIII преобладала переложная система земледелия, впоследствии вытесненная трехпольной системой к началу XIX. В конце XIX в. – начале XX в. увеличение численности населения привело к нехватке обрабатываемой земли и, как следствие, к распространению двупольной системы, исключая парующие поля. Начиная с 1930-х годов стали появляться многопольные севообороты; доля пропашных культур в составе севооборотов увеличивалась вплоть до конца 1960-х годов, и к настоящему времени структура посевных площадей изменилась слабо. В настоящее время в структуре посевных площадей Белгородской области (в том числе Прохоровского района) из зерновых культур преобладают яровой ячмень и озимая пшеница, из пропашных культур – кукуруза и сахарная свекла. В период с 1964 г. по 2004 г. возросла доля многолетних трав, которая с 2005 г. начала снижаться. Доля подсолнечника в структуре севооборота увеличилась, начиная с 1999 г. Механизированная обработка почв (отвальная вспашка с оборотом пласта) стала преобладать с 1930 г. В последние десятилетия, наряду с отвальной вспашкой, внедряется плоскорезная вспашка, дискование, технологии “no-till” и “strip-till” ([Заздравных, 2017](#)).

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов для построения карт степени эродированности почв использованы данные полевого почвенного опробования в 639 точках, цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 20 м, карта длительности сельскохозяйственного освоения (рис. 2). Данные предоставлены ФГБУ «Центром агрохимической службы “Белгородский”».

Карта длительности сельскохозяйственного освоения составлена с использованием планов Генерального Межевания конца XVIII в., а также литературных источников, посвященных особенностям освоения данной территории ([Чендев, 1997](#), [2008](#); [Чен-](#)

[дев, Петин, 2006, 2008](#); [Белеванцев, Чендев, 2015](#); Особенности..., 2015 и др.).

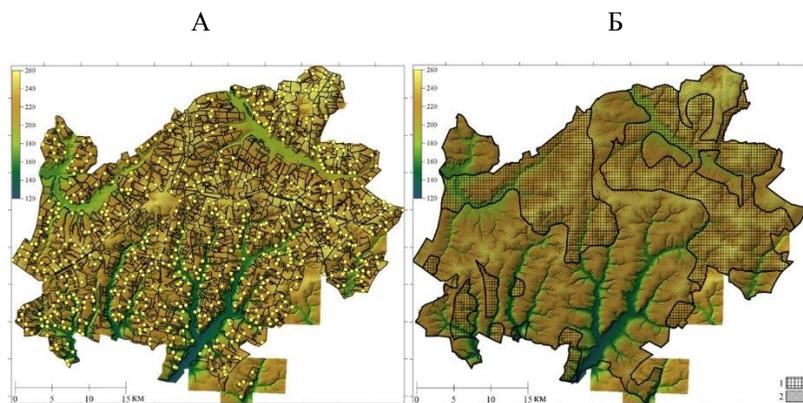


Рис. 2. Цифровая модель рельефа с указанием расположения точек полевого почвенного опробования (А) и участками с различным периодом сельскохозяйственного освоения (Б: 1 – 1780–1920 гг., 2 – 1600–1780 гг.).

Fig. 2. Digital elevation model with the sampling points (А) and the areas with different periods of agricultural development (Б: 1 – 1780–1920 period, 2 – 1600–1780 period).

Для расчетов были использованы средние длительности распашки, принятые для территорий, освоенных в период 1600–1780 гг., – за 310 лет, для территорий, освоенных в период 1780–1920 гг., – за 170 лет. Диагностика степени эродированности почв проводилась на основании разницы между мощностью гумусового горизонта почвы местного водораздела и мощностью исследованной почвы (согласно [Соловиченко и др., 2014](#)); выборку составляли незэродированные и слабоэродированные почвы (Э1; мощность гумусового горизонта на 0–20 см меньше, чем на водоразделе; 478 точек), среднеэродированные (Э2, мощность гумусового горизонта на 20–40 см меньше; 157 точек) и сильноэродированные почвы (мощность гумусового горизонта более чем на 40 см меньше; 4 точки). Обработка предоставленных данных проводилась в программах SAGA GIS, GRAS GIS, ArcGis, Statistica. Математическое

моделирование ЭА процессов осуществлялось на основе WaTEM/SEDEM v. 2004 ([Van Oost et al., 2000](#); [Van Rompay et al., 2001](#)).

Построение модели фактор – свойство (ФС)

Построение математической модели, напрямую связывающей факторы ЭА процессов и степень эродированности почв, было выполнено с использованием линейного дискриминантного анализа с пошаговым отбором предикторов ([Webster, Burrough, 1974](#)). Примеры использования этого метода в цифровом почвенном картографировании приведены в работах ([Сорокина, Козлов, 2009](#); [Digital..., 2008](#); [Lozbenov et al., 2019](#)). В качестве факторов ЭА процессов были использованы морфометрические параметры рельефа и климата, рассчитанные для каждого элемента регулярной сетки (20 × 20 м) пашни Прохоровского района. Были получены значения экспозиции и крутизны склонов, глубины замкнутых депрессий, поперечной, плановой и общей кривизны, общей и модифицированной площади водосбора, топографического индекса влажности, индекса длины и крутизны склона (LS-фактор), превышения над базисом эрозии, индекса неровности поверхности (TRI), относительного превышения (TPI) в окрестности 250 м, 500 м, 1 000 м и далее до 4 000 м с шагом в 500 м, величина потенциальной суммарной солнечной радиации, значения перераспределенного слоя осадков. Таким образом, обучающую выборку анализа составили полевые описания свойств почв (степени эродированности) в 639 точках опробования и количественные данные о факторах ЭА процессов.

Методом линейного дискриминантного анализа были выявлены наиболее значимые факторы, обуславливающие пространственную дифференциацию степени эродированности почв, и предсказана вероятность встречи (от 0 до 1) почв категорий Э1, Э2 и Э3 для каждого пиксела карты. В качестве критерия оценки значимости связи между количественными параметрами факторов почвообразования и степени эродированности почв был выбран критерий Фишера.

Построение моделей фактор – процесс – свойство

Для анализа возможностей цифрового почвенного картографирования, основанного на модели фактор – процесс – свойство, было построено две карты: одна, учитывающая только пространственные особенности протекания ЭА процессов (карта и модель ФП_{хС}), другая – дополнительно учитывающая продолжительность ЭА процессов (карта и модель ФП_{х,tС}).

Модель WaTEM/SEDEM v. 2004 г. ([Van Oost et al., 2000](#); [Van Rompay et al., 2001](#)), основанная на модифицированном универсальном уравнении эрозии почв RUSLE, была использована для предсказания пространственной неоднородности протекания ЭА процессов. Входными параметрами для данной модели и количественными характеристиками факторов почвообразования являются: эрозионный потенциал дождевых осадков, коэффициент противоэрозионной устойчивости почв, эрозионный индекс возделываемых культур в среднемноголетнем севообороте, LS-фактор. Подробное описание параметров, использованных при моделировании ЭА процессов на территории пашни Прохоровского района, а также результаты цифрового картографирования эродированности почвенного покрова по модели ФП_{хС} и его сравнение с традиционным способом картографирования были проанализированы авторами ранее ([Жидкин и др., 2021](#)). Приведем здесь только значения использованных параметров: коэффициент противоэрозионной устойчивости почв был задан равным 35 кг·га·час/га·мДж·мм; эрозионный индекс возделываемых культур в среднемноголетнем севообороте равнялся 0.4; значения эрозионного потенциала дождевых осадков для территории исследования варьируют от 270 до 320 МДж·мм·га⁻¹·час⁻¹·год⁻¹; значения LS-фактора рассчитаны на основании цифровой модели рельефа для каждой ячейки регулярной сетки.

В результате применения модели WaTEM/SEDEM были получены темпы ЭА процессов для каждой ячейки регулярной сетки (расчетные темпы эрозии были ранжированы с шагом в 5 т/га в год. Таким образом была получена информация о пространственных особенностях протекания процесса. Для учета влияния ЭА процессов на почвенный покров с учетом их продолжительности для каждой ячейки регулярной сетки Прохоровского района были

рассчитаны суммарные эрозионные потери за весь период сельскохозяйственного освоения путем умножения среднемноголетних темпов эрозии почв (т. е. результата эрозионного моделирования) на количество лет распашки с помощью инструмента “калькулятор растров” в программе ArcGIS 10.5. Далее было принято допущение о неизменности темпов эрозии почв за агрикультурный период. Для уточнения средних многолетних темпов эрозии почв за период распашки требуется детализация информации об изменении факторов ЭА процессов во времени, такая детализация крайне трудоемка и лишь приближает к уточнению результата, не гарантируя абсолютной точности. Отметим, что в данном исследовании разрабатываемый подход носит, в том числе, методический характер и позволяет, при наличии данных об изменении факторов среды во времени, учитывать их при картографировании степени эродированности почвенного покрова.

Эмпирические функции принадлежности категорий почв разной степени эродированности и расчетных темпов эрозии почв получены следующим образом. Были сопоставлены темпы ЭА процессов, полученные с использованием модели WaTEM/SEDEM, и значения степени эродированности почв в 639 точках полевого опробования (путем наложения точек полевого опробования на карту темпов ЭА процессов и присвоения данных о темпах эрозии точкам). Таким образом, каждая точка полевого опробования содержала информацию о степени эродированности почв и расчетных темпах ЭА процессов. Для каждой градации расчетных темпов эрозии (0–5, 5–10, 10–15 и т. д. т/га в год) было рассчитано долевое участие почв разной степени эродированности: к примеру, 282 точки опробования расположены на участках с расчетными темпами эрозии почв 0–5 т/га год; из них 268 точек диагностированы как Э1, 14 точек – как Э2, Э3 не обнаружены. При пропорциональном расчете получается, что доля Э1 в составе почвенного покрова ячеек раstra с темпами эрозии 0–5 т/га год составляет 0.95, Э2 – 0.05, Э3 – 0. Аналогично получено долевое участие почв разной степени эродированности для точек опробования с темпами эрозии 5–10, 10–15 и т. д. т/га в год. На следующем этапе были построены три графика, отражающие зависимость долевого участия почв каждой степени эродированности (Э1, Э2 и

Э3) от темпов эрозии почв. Эти графики были аппроксимированы (величина достоверности аппроксимации более 0.8), получены формулы эмпирических функций принадлежности. Эмпирические функции принадлежности в модели $\Phi\Pi_{x,t}C$ были построены аналогичным образом, но вместо расчетных темпов эрозии были использованы суммарные эрозионные потери.

Построение карт доминантной категории степени эродированности почв, неопределенности прогноза и карт комбинаций почв разной степени эродированности

Результатами применения моделей ΦC , $\Phi\Pi_x C$ и $\Phi\Pi_{x,t} C$ являются таблицы, где каждая отдельная строка содержит информацию о координатах центра пикселя размером 20×20 м, апостериорная вероятность встречи в этом пикселе (от 0 до 1) неэродированных и слабоэродированных почв, среднеэродированных, сильноэродированных почв. Каждая из таблиц содержит чуть более 2 млн строк.

Построение карт доминантных категорий и неопределенности прогноза (или максимальной апостериорной вероятности) было проведено следующим образом. Для каждого пикселя было выполнено сравнение значений апостериорных вероятностей встречи Э1, Э2, Э3 и выявлена преобладающая категория степени эродированности почв. Информация о доминантной (преобладающей) категории почв и апостериорная вероятность встречи этой категории в пикселе были добавлены в новые столбцы таблицы. В программе SAGA GIS полученная таблица была преобразована в набор точечных данных (каждая точка соответствовала центру пикселя 20×20 м). Значения в точках (доминантная категория степени эродированности почв, максимальная апостериорная вероятность) были интерполированы на всю территорию пашни Прохоровского района методом ближайшего соседа (Nearest neighbor).

Для построения всех карт комбинаций почв разной степени эродированности было принято следующее допущение: вероятность встречи категорий Э1, Э2, Э3 в пикселе интерпретируется как доля пикселя, занимаемая Э1, Э2, Э3 почвой ([Сорокина, Козлов, 2009](#)). По соотношению долей было выделено 5 комбинаций

почв разной степени эродированности (табл. 1) в соответствии с нормами “[Общесоюзной инструкции по почвенному обследованию...](#)” (1973, стр. 16) и с добавлениями авторов (в колонке дополнительные условия).

Таблица 1. Критерии выделения комбинаций почв на основе долевого участия неэродированных и слабоэродированных (Э1), среднеэродированных (Э2), сильноэродированных (Э3) почв в пикселе
Table 1. Criteria for identifying combinations of soils with varying erosion degrees based on the share of non-eroded and slightly eroded (E1), moderately eroded (E2), strongly eroded (E3) soils in a pixel

Комбинации почв		Критерии на основе долевого участия почв различной степени эродированности	
№	Название	Э1	Дополнительные условия
1	“зональные” с преобладанием неэродированных и слабоэродированных почв	$\text{Э1} > 0.9$	-
2	“эрозионно-зональные” с долей средне- и сильноэродированных почв менее 0.25	$0.75 \leq \text{Э1} < 0.9$	-
3	“слабоэродированные” с долей средне- и сильноэродированных почв менее 0.5	$0.5 \leq \text{Э1} < 0.75$	-
4	“среднеэродированные” с долей средне- и сильноэродированных почв более 0.5 и преобладанием среднеэродированных над сильноэродированными почвами	$\text{Э1} < 0.5$	$\text{Э2} > \text{Э3}$
5	“сильноэродированные” с долей средне- и сильноэродированных почв более 0.5 и преобладанием сильноэродированных над среднеэродированными почвами	$\text{Э1} < 0.5$	$\text{Э3} > \text{Э2}$

Названия комбинаций почв предложены авторами с учетом развития терминов, использованных в работах Н.П. Сорокиной (2006). Комбинации почв ранжированы в порядке увеличения степени эродированности почв в составе пиксела – от 1 (с наименьшей долей эродированных почв) до 5 (с наибольшей долей эродированных почв). Интерполяция точечных данных, изъятых из таблицы, проводилась методом ближайшего соседа (Nearest neighbor) так же, как и в случае картографирования доминантной категории почв. Подсчет площадей неэродированных и слабоэродированных, средне- и сильноэродированных почв в составе комбинаций почв проводилось на основании таблиц апостериорных вероятностей.

Оценка точности, неопределенности прогноза и идентичности карт

Точность моделей (или пользовательская точность) оценивалась путем сопоставления предсказанной доминантной и фактической (т. е. диагностированной при полевом обследовании) категории эродированности почв в точке полевого опробования. Точность выражена в процентах. Значение неопределенности прогноза и максимальная апостериорная вероятность встречи той или иной категории степени эродированности почв в пикселе вместе дают единицу; чем больше апостериорная вероятность, тем меньше неопределенность прогноза, и наоборот. Значения апостериорных вероятностей прогноза получены в результате применения линейного дискриминантного анализа для модели ФПС и эмпирических функций принадлежности для моделей ФП_xС и ФП_{x,t}С. Идентичность (или соответствие карт) оценено путем сравнения значения пикселей, обладающих одинаковым пространственным положением, но показанных на разных картах; идентичность карт оценена в процентах от всех пикселей карты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модель фактор-процесс

Из всех 23 используемых в анализе количественных параметров рельефа и климата значимыми (т. е. обуславливающими пространственную дифференциацию степени эродированности почв) оказались следующие: LS-фактор, относительное превыше-

ние в окрестности (Topographic Position Index (TPI)) 500 и 4 000 метров. LS-фактор характеризует эрозионный потенциал рельефа и рассчитывается как отношение длины склона к размеру водосбора. Чем больше значение LS-фактора, тем больше эрозионный потенциал рельефа. Значение относительного превышения в окрестности определяется путем сравнения значения высоты каждого пикселя со средней высотой в заданной окрестности. Отрицательные значения индекса TPI свидетельствуют о преимущественном накоплении вещества, положительные – о выносе. Отметим, что критерий Фишера для экспозиции склонов оказался очень низким и составил лишь 0.847, вероятно, в связи с относительно небольшим вкладом талого смыва в среднемноголетние темпы эрозии почв на данной территории. Пользовательская точность модели составила 78.4%.

Модели ФП_хС и ФП_хС

Сельскохозяйственное освоение на территории исследования проходило в первую очередь на участках в среднем относительно слабо подверженных ЭА процессам. Расчетные средние темпы эрозии почв на участках с длительностью распашки более 300 лет составили ~4.4 т/га в год; а на участках с длительностью распашки около 170 лет – почти в 2 раза больше ~7.5 т/га в год. Как следствие, различия в степени эродированности почвенного покрова между участками с разной длительностью распашки оказались выражены не очень контрастно на данной территории.

Эмпирические функции принадлежности категорий почв разной степени эродированности и расчетных темпов эрозии почв имеют следующий вид для модели ФП_хС:

$$\mu_{Э0} + \mu_{Э1} = \exp(-0.05 \cdot x) \quad (1)$$

$$\mu_{Э2} = -0.2186 + 0.6532 \cdot \log_{10}(x) \quad (2)$$

$$\mu_{Э3} = -0.0066 + 0.0018 \cdot x \quad (3),$$

где $\mu_{Э0} + \mu_{Э1}$ – вероятность долевого участия неэродированных и слабоэродированных почв;

$\mu_{Э2}$ – вероятность долевого участия среднеэродированных почв;

$\mu_{Э3}$ – вероятность долевого участия сильноэродированных почв;

x – расчетные темпы эрозии почв.

Пользовательская точность данной модели при предсказании доминантной категории составила 80.9%.

Эмпирические функции принадлежности категорий почв разной степени эродированности и расчетных суммарных эрозионных потерь имеют следующий вид для модели $\Phi\Pi_{x,t}C$:

$$\mu_{Э0} + Э1 = \exp(-0.0026 \cdot x) \quad (4)$$

$$\mu_{Э2} = 0.003 + 0.0026 \cdot x - 2.5251E - 6 \cdot x^2 \quad (5)$$

$$\mu_{Э3} = 0.005 - 4.1928E - 5 \cdot x + 2.7762E - 7 \cdot x^2 \quad (6),$$

где x – расчетные объемы суммарных эрозионных потерь.

Пользовательская точность данной модели при предсказании доминантной категории составила 79.5%.

Карты доминантных категорий степени эродированности почв

На рисунке 3 показаны доминантные категории почв, пространственное положение которых предсказано по моделям ΦC , $\Phi\Pi_x C$ и $\Phi\Pi_{x,t} C$. Несмотря на использование различных моделей при картографировании, можно отметить высокую степень соответствия карт между собой. Более 90% от всей территории пашни Прохоровского района показано одинаковой категорией степени эродированности почв на всех трех картах (предсказанная степень эродированности почв по моделям ΦC и $\Phi\Pi_x C$ совпадает в 91% случаев, ΦC и $\Phi\Pi_{x,t} C$ – в 92% случаев, $\Phi\Pi_x C$ и $\Phi\Pi_{x,t} C$ – в 95% случаев). Преобладающими категориями на всех трех картах (табл. 2) являются неэродированные и слабоэродированные почвы, приуроченные к обширным водораздельным пространствам и пологим склонам с небольшим углом наклона. На их долю, в зависимости от используемой для предсказания модели, приходится от 77 до 79 тыс. га. Среднеэродированные почвы окаймляют крутые участки пахотных склонов и занимают от 6 до 7 тыс. га (преимущественно южная и юго-восточная часть Прохоровского района). Сильноэродированные почвы предсказаны только с использовани-

ем моделей $ФП_xC$ и $ФП_{x,t}C$, встречаются локально на склонах крутизной более 5° . Эти почвы занимают 1.3 га на карте $ФП_xC$ и 682 га на карте $ФП_{x,t}C$. Таким образом, общая доля средне- и сильноэродированных почв возрастает в ряду карт, построенных по моделям $ФС - ФП_xC - ФП_{x,t}C$.

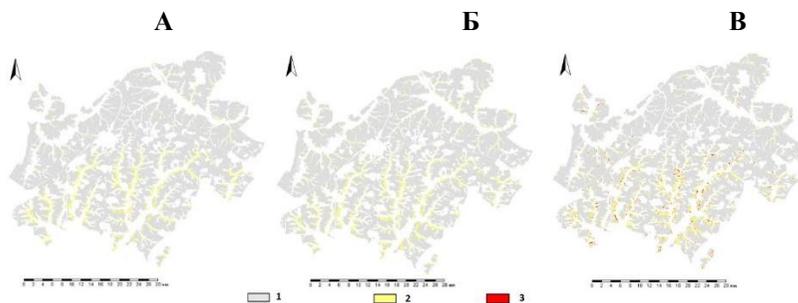


Рис. 3. Карты эродированности почвенного покрова пашни Прохоровского района (1 – неэродированные и слабоэродированные, 2 – среднеэродированные; 3 – сильноэродированные), предсказанные по моделям $ФС$ (А), $ФП_xC$ (Б) и $ФП_{x,t}C$ (В). Белым показаны непахотные земли.

Fig. 3. Maps of erosion degree of the arable soil in the Prokhorovsky district (1 – non-eroded and slightly eroded, 2 – moderately eroded; 3 – heavily eroded), predicted by the models FP (А), FP_xP (Б) and $FP_{x,t}P$ (В). Non-arable lands are shown in white.

В предыдущем исследовании ([Жидкин и др., 2021](#)) было проведено сравнение карт доминантных категорий степени эродированности почв пашни Прохоровского района, построенных визуально-экспертным и цифровым методом (с использованием модели $ФП_xC$). В некоторой степени такое сравнение может являться оценкой адекватности построения карт методами цифрового картографирования. Было выявлено, что карты характеризуются высокой степенью соответствия (идентичность для 75% пикселей карт).

Таблица 2. Площади почв разной степени эродированности пашни Прохоровского района (в тыс. га), по данным применения моделей ФС, ФП_хС и ФП_{х,t}С

Table 2. Areas of soils of varying erosion degree of arable soils in the Prokhorovsky district (in thousand hectares), according to the FP, FP_хP and FP_{х,t}P models

Модель, использованная для создания карты		Площади почв разной степени эродированности (тыс. га)		
		Э1	Э2	Э3
ФС	доминантная категория	79.3	6.1	0
	долевое участие почв в пикселе	72.6	12.5	0.3
ФП _х С	доминантная категория	78.2	7.2	0.001
	долевое участие почв в пикселе	70.7	14.2	0.5
ФП _{х,t} С	доминантная категория	77.7	7	0.7
	долевое участие почв в пикселе	68.9	15.2	1.3

Карты неопределенности прогноза доминантной категории почв

Карты неопределенности прогноза (или максимальной апостериорной вероятности встречи одной из категорий степени эродированности почв, рис. 4), с одной стороны, показывают область применения используемой модели для предсказания доминантной категории почв – т. е. выявляют те участки, в пределах которых можно с большей или меньшей уверенностью говорить о преобладании той или иной почвы в пикселе; с другой стороны, интерпретация карт позволяет говорить о сложности почвенного покрова территории – в случае низкого значения апостериорной вероятности присутствие нескольких категорий почв в пределах пикселя становится более вероятным, а значит, почвенный покров таких пикселей является наиболее сложно устроенным ([Сорокина, Козлов, 2009](#); [Digital... 2008](#)).

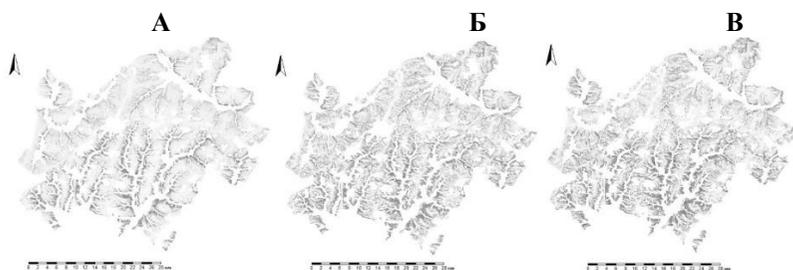


Рис. 4. Неопределенность прогноза доминантной категории почв в пределах пашины Прохоровского района (белым показаны непахотные земли), предсказанной по моделям ФС (А), ФП_xС (Б) и ФП_{x,t}С (В); чем темнее – тем выше неопределенность прогноза и тем меньше максимальная апостериорная вероятность встречи одной из категорий степени эродированности почв.

Fig. 4. The prediction uncertainty of the dominant category of arable soils in the Prokhorovsky district (non-arable lands are shown in white), by the models FP (A), FP_xP (Б) and FP_{x,t}P (В); the darker, the higher the prediction uncertainty and the lower the maximum a posteriori probability of one of the categories of the erosion degree of soils.

Значения неопределенности прогноза на всех трех картах увеличивается в пределах склонов, особенно в их нижних частях. Максимальные значения неопределенности в пределах нижних частей склонов характерны для карты ФП_{x,t}С. Апостериорная вероятность встречи одной из категорий степени эродированности почв превышает 90% для двух третей пашины Прохоровского района при использовании модели ФС. В случае моделей ФП_xС и ФП_{x,t}С такая высокая апостериорная вероятность наблюдается только лишь для двух пятых исследуемой территории. Таким образом, мы наблюдаем разные пространственные особенности неопределенности прогноза модели ФС и моделей ФП_xС, ФП_{x,t}С при их общей высокой пользовательской точности (во всех трех случаях точность превышает 78%).

Наложение сетки размерами 20 × 20 м (параметры используемой в работе ячейки раstra) на детальные почвенные карты при водораздельных и прибалочных склонов Среднерусской возвышенности, опубликованные в работах ([Фишман, 1977](#); [Сорокина,](#)

[1976](#)), показывают, что в пределах этих ячеек встречается, как правило, два и более контура элементарных почвенных ареалов с разной степенью эродированности (например, черноземы типичные слабоэродированные, черноземы типичные карбонатные среднеэродированные и т. д.). Аналогичные особенности (присутствие разных почв по степени эродированности в ячейке размером 20×20 м) характерны для детальных почвенных карт юга Молдавии и Придунайской равнины ([Пугаев, 1976](#); [Годельман, Пугаев, 1979](#)). В упомянутых работах, а также в других ([Сорокина, 1966](#); [Сорокина, 1988](#); [Григорьев, 1975](#); [Васенёва и др., 2000](#)) показано, что при движении от водораздельных поверхностей к приводораздельным и прибалочным склонам происходит заметное усложнение почвенного покрова за счет уменьшения размеров контуров элементарных почвенных ареалов и появления новых компонентов почвенного покрова, в том числе почв разной степени эродированности. Так, наблюдаемое на построенных картах увеличение неопределенности прогноза при движении от водораздельных поверхностей к склонам совпадает с усложнением строения почвенного покрова в этом направлении; следовательно, низкая точность прогноза на прибалочных склонах может быть обусловлена не особенностями используемых моделей, а сложностью почвенного покрова этих участков – присутствием разных почв при одинаковых физико-географических условиях (усредненных для полигонов размерами 20×20 м). Увеличение точности предсказания почв (доминантных почвенных категорий) в пределах прибалочных склонов следует ожидать при увеличении пространственного разрешения цифровых данных. При пространственном разрешении, соответствующем 20×20 м, отображение комбинаций почв, а не доминантных почвенных категорий, более полно отражает особенности почвенного покрова приводораздельных и прибалочных склонов агроландшафтов лесостепной зоны, поскольку показывает присутствие разных почв в пределах контуров размерами 20×20 м. На основании визуального сравнения карт неопределенности прогноза можно предположить, что модели ФП_хС и ФП_{х,1}С предсказывают более сложное строение почвенного покрова исследуемой территории, чем модель ФС.

Карты комбинаций почв разной степени эродированности

Различия между картами и данными о площади эродированности почв определяются не только использованными моделями (ФС, ФП_xС и ФП_{x,t}С), но и средствами генерализации информации при их отображении на картах. Так, при переходе от доминантных категорий почв к учету долевого участия почв в каждом пикселе отмечается значительное (двукратное) увеличение расчетной площади средне- и сильноэродированных почв в составе почвенного покрова (табл. 2). Это объясняется тем, что, в пикселях с преобладанием незэродированных и слабоэродированных почв данные о сопутствующих средне- и сильноэродированных разностях генерализируются при составлении карты доминантных категорий, что приводит к уменьшению расчетной площади эродированных почв и увеличению доли незэродированных почв на этих картах. Карты комбинаций почв разной степени эродированности являются “промежуточным звеном” между картами доминантных категорий почв и табличной информацией о долевым участии почв в каждом пикселе. Необходимо совершенствование картографических подходов для более детального отображения информации о долевым участии почв разной степени эродированности на картах.

Карты комбинаций почв разной степени эродированности, полученные на основании использования трех моделей, представлены на рисунке 5, данные о площадях, занимаемых различными комбинациями почв, приведены в таблице 3. Для всех карт наблюдается уменьшение площадей комбинаций почв в порядке: зональные – эрозионно-зональные – слабоэродированные – среднеэродированные – сильноэродированные. При этом площади зональных, эрозионно-зональных и слабоэродированных комбинаций почв, показанные на карте ФС и картах ФП_xС, ФП_{x,t}С, отличаются 1.5–2 раза в сторону большей степени эродированности почв на картах, учитывающих особенности ЭА процессов. Площадь среднеэродированных комбинаций почв на всех трех картах приблизительно одинакова.

Таблица 3. Площади комбинаций почв разной степени эродированности (в тыс. га)

Table 3. Areas of soil combinations with various erosion degrees (thousand hectares)

Комбинации почв разной степени эродированности	Площади комбинаций почв разной степени эродированности (в тыс. га), полученные с использованием разных моделей		
	ФС	ФП _х С	ФП _{х,t} С
зональные	53.3	33.6	36.8
эрозионно-зональные	18.5	30.1	27.2
слабоэродированные	7.4	14.5	14.4
среднеэродированные	6.2	7.2	7
сильноэродированные	0	0.001	0.5

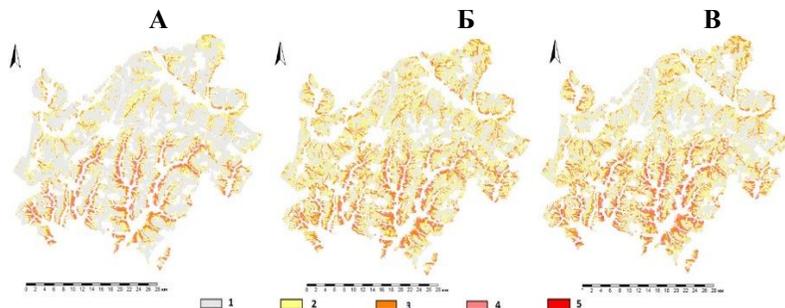


Рис. 5. Карты комбинаций почв разной степени эродированности (1 – зональные, 2 – эрозионно-зональные; 3 – слабоэродированные; 4 – среднеэродированные; 5 – сильноэродированные) в пределах пашни Прохоровского района (белым показаны непахотные земли), предсказанные по моделям ФС (А), ФП_хС (Б) и ФП_{х,t}С (В).

Fig. 5. Maps of combinations of soils with varying erosion degrees (1 – zonal, 2 – erosion-zonal; 3 – slightly eroded; 4 – moderately eroded; 5 – heavily eroded) within the the Prokhorovsky district (non-arable lands are shown in white), predicted by FP models (А), FP_хP (Б) and FP_{х,t}P (В).

Визуальное сравнение карт доминантных категорий и карт комбинаций почв разной степени эродированности, построенных на основании одной модели (т. е. сравнение карты доминантной категории (модель ФС) и комбинаций почв (модель ФС), сравнение карты доминантной категории (модель ФП_хС) и комбинаций почв (модель ФП_хС) и т. д.) свидетельствует о практически одинаковом пространственном положении среднеэродированных почв на карте доминантных категорий и среднеэродированных комбинаций на карте комбинаций почв, сильноэродированных почв на карте доминантных категорий и сильноэродированных комбинаций на карте комбинаций почв, а также о близких значениях площадей данных ареалов (табл. 2, 3). Контуры неэродированных и слабо-эродированных почв, представленные на карте доминантных категорий, разбиваются на три группы (зональные, эрозионно-зональные и слабоэродированные) на карте комбинаций почв.

В отличие от карт доминантных категорий, характеризующихся идентичностью для 90% территории пашни Прохоровского района, карты комбинаций почв отличаются друг от друга в значительно большей мере (табл. 4). Карты, построенные на основе моделей ФП_хС и ФП_{х,t}С, характеризуются большим соответствием друг другу (идентичны в 75.4% пикселей), чем карте, построенной на основании модели ФС (соответствие пикселей в 60%). Как правило, различие между картами в зонах несоответствия слабоконтрастно, наблюдается различие в одну категорию эродированности. Например, если на карте ФС показана “слабоэродированная” комбинация почв, то на карте ФП_хС показана “эрозионно-зональная” или “среднеэродированная” комбинация. При этом на картах, построенных по моделям ФП_хС и ФП_{х,t}С в большинстве случаев (~70% случаев) отображаются комбинации с большей долей эродированных почв в их составе, чем на карте, построенной по модели ФС. При сравнении карт, построенных по моделям ФП_хС и ФП_{х,t}С, комбинации почв с большей долей эродированных компонентов могут быть равновероятно показаны как на карте, учитывающей длительность ЭА процессов, так и без нее. Различия в две и более градаций комбинаций почв по степени эродированности практически не встречаются (табл. 4).

Таблица 4. Матрица соответствия и различия пространственного положения комбинаций почв разной степени эродированности (в процентах)

Table 4. Matrix of correspondence and differences in the spatial position of soil combinations with various erosion degrees (percentage)

	Полное соответствие			Различие в 1 категорию			Различие в 2 категории			Различие в 3 категории		
	ФС	ФП _{хС}	ФП _{х,tС}	ФС	ФП _{хС}	ФП _{х,tС}	ФС	ФП _{хС}	ФП _{х,tС}	ФС	ФП _{хС}	ФП _{х,tС}
ФС	100	60.7	59.6	0	36.8	36.4	0	2.4	3.7	0	0.1	0.3
ФП _{хС}	60.7	100	75.4	36.8	0	23.5	2.4	0	0.9	0.1	0	0.1
ФП _{х,tС}	59.6	75.4	100	36.4	23.5	0	3.7	0.9	0	0.3	0.3	0

Максимальное соответствие пространственного положения почвенных комбинаций при разных способах моделирования наблюдается на приводораздельных участках с уклонами менее 1° (рис. 6), поскольку все модели свидетельствуют о слабой эродированности почв на данных участках (соответствие более чем для 95% пикселей). Наибольшие различия отмечаются при сравнении моделей ФС – ФП_{хС} и ФС – ФП_{х,tС} в верхних частях склонов с уклонами 1–3° – около 60% территории, приуроченной к склонам крутизной 1–3°, представлены разными комбинациями почв на картах ФС и ФП_{хС}, ФС и ФП_{х,tС}. При увеличении крутизны склонов, различия между картами последовательно уменьшаются. При углах наклона в 5–7° на разных картах показана одна и та же комбинация почв в более чем 70% случаев.

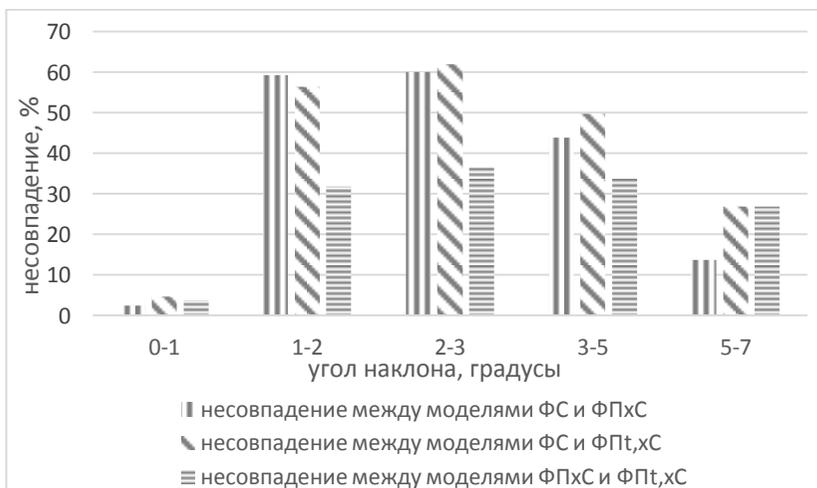


Рис. 6. Площади зон несоответствия (в процентах от всей площади пашни Прохоровского района) комбинаций почв разной степени эродированности, построенных с использованием моделей ФС, ФП_хС и ФП_{х,t}С.

Fig. 6. Areas of inconsistency zones (as a percentage of the total arable land in the Prokhorovsky district) of soil combinations with various erosion degrees, predicted by the models FP, FP_xP and FP_{x,t}P.

Различие карт комбинаций почв, построенных по моделям ФП_хС и ФП_{х,t}С, при крутизне более 1° варьирует от 27 до 37% и не связано с углом наклона склона; оно обусловлено длительностью сельскохозяйственного освоения на разных участках исследуемой территории, которая в первую очередь определялась особенностями расселения.

На рисунке 7 представлены результаты наложения карт ФП_хС и ФП_{х,t}С друг на друга. Серым цветом показаны участки соответствия карт – несмотря на включение временной составляющей в алгоритм картографирования, комбинации почв (рис. 7А) и доминантная категория почв (рис. 7Б) не изменились. Зоны несоответствия карт друг другу показаны синим и красным цветом; они приурочены к границам перехода одной категории (доминантной категории (рис. 7А) или комбинации почв (рис. 7Б)) к

другой. На участках с меньшей продолжительностью распашки в пределах зон несоответствия показана меньшая степень эродированности на карте $ФП_{x,t}C$, в сравнении с картой $ФП_xC$ (синий цвет); на участках с более продолжительной историей сельскохозяйственного освоения наблюдается обратная картина (красный цвет).

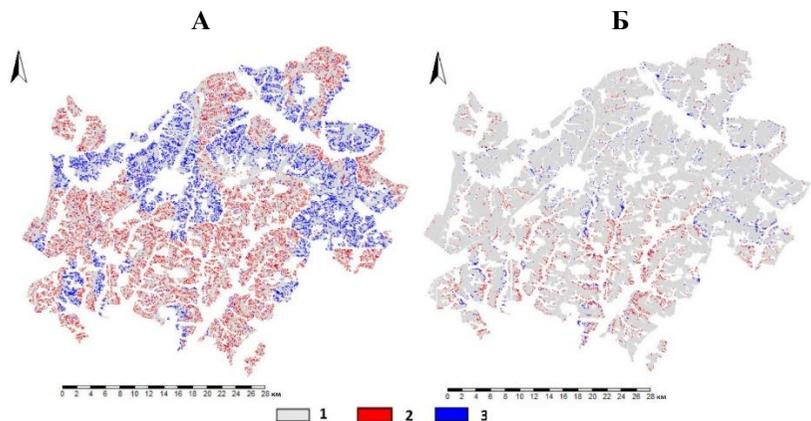


Рис. 7. Наложение карт комбинаций почв разной степени эродированности (А) и доминантных категорий почв (Б), построенных по моделям $ФП_xC$ и $ФП_{x,t}C$; 1 – зоны соответствия, 2 – зоны несоответствия в сторону большей эродированности на карте $ФП_{x,t}C$ в сравнении с картой $ФП_xC$, 3 – зоны несоответствия в сторону меньшей эродированности на карте $ФП_{x,t}C$ в сравнении с картой $ФП_xC$.

Fig. 7. Overlay of maps of soil combinations with various erosion degrees (А) and dominant categories of soils (Б), predicted by the models FP_xP and $FP_{x,t}P$; 1 – zones of accordance, 2 – zones of inconsistency – more eroded on the $FP_{x,t}P$ map in comparison with the FP_xS map, 3 – zones of inconsistency – less eroded on the $FP_{x,t}P$ map in comparison with the FP_xS map.

Размеры зон несоответствия (протяженность вдоль склонов) варьируют от 20 до 300 м на картах комбинаций почв и от 20 до 100 м на картах доминантных категорий. Использование комбинаций почв разной степени эродированности в качестве объектов картографирования позволяет выделить на исследуемом участке

зоны несоответствия не только в пределах прибалочных склонов (как и при использовании доминантных категорий), но и на выровненной субгоризонтальной поверхности. Учет длительности распашки в алгоритме цифрового почвенного картографирования приводит к корректировке границ распространения различных доминантных категорий/комбинаций почв разной степени эродированности, при этом содержание основных (расположенных в центре контура) частей этих доминантных категорий/комбинаций почв в пределах исследуемого участка не затрагивается.

ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы по цифровому картографированию степени эродированности почв пашни Прохоровского района, основанному на моделях фактор – свойство (ФС), фактор – процесс – свойство без учета длительности распашки (ФП_{хС}) и фактор – процесс – свойство с учетом длительности распашки (ФП_{х,tС}), можно сделать следующие выводы:

- цифровые методы картографирования доминантной категории степени эродированности почв, основанные на моделях ФС, ФП_{хС} и ФП_{х,tС}, обладают высокой пользовательской точностью, о чем свидетельствует сравнение предсказанных и наблюдаемых в точках полевого опробования значениях степени эродированности почв (точность выше 78% для всех трех моделей);

- карты доминантных почвенных категорий, построенные с использованием разных моделей, характеризуются высокой степенью соответствия друг другу (идентичность предсказания для ~90% пикселей); преобладающими по площади доминантными категориями на исследованной территории являются незэродированные и слабоэродированные почвы. При этом отмечается увеличение степени эродированности почвенного покрова в ряду карт, построенных по моделям ФС – ФП_{хС} – ФП_{х,tС}. Сильноэродированные почвы были выделены только при использовании модели ФП_{х,tС};

- при картографировании комбинаций почв разной степени эродированности идентичность пикселей отмечена в 60% случаев для карт ФС и ФП_{хС}, ФС и ФП_{х,tС}, в 75% случаев для карт ФП_{хС} и ФП_{х,tС}. Площади зональных, эрозионно-зональных и слабоэроди-

рованных комбинаций почв, показанные на карте ФС и картах ФП_хС, ФП_{х,t}С отличаются в 1.5–2 раза в сторону большей степени эродированности почв на картах ФП_хС и ФП_{х,t}С. При этом площадь среднеэродированных комбинаций почв на всех трех картах приблизительно одинакова. Преобладающими комбинациями почв во всех трех случаях являются комбинации с долей средне- и сильноэродированных почв менее 0.1 (зональная комбинация почв);

- в зонах несоответствия карт комбинаций почв разной степени эродированности, построенных с использованием разных моделей, различия являются слабоконтрастными. Как правило, наблюдаются отличия в одну категорию степени эродированности почв. На картах ФС в большинстве случаев (~70% случаев) показана меньшая степень эродированности, чем на картах, построенных по моделям ФП_хС и ФП_{х,t}С. В случае последних комбинации почв с большей долей средне- и сильноэродированных почв могут равновероятно быть показаны как на карте, учитывающей историю распашки, так и без нее;

- традиционно принято считать, что одним из ведущих факторов, определяющих эродированность почвенного покрова, является длительность распашки. Однако на данной территории сельскохозяйственное освоение проходило в первую очередь на участках, слабо подверженных эрозии. Расчетные темпы эрозии почв на участках с высокой длительностью распашки (освоенные в 1600–1780 гг.) оказались почти в 2 раза ниже по сравнению с участками с непродолжительной распашкой (освоенные в 1780–1880 гг.). Как следствие, различия в степени эродированности почвенного покрова между участками с разной длительностью распашки выражены неконтрастно. Поэтому карты, построенные на основе моделей ФП_хС и ФП_{х,t}С, для данной территории оказались достаточно близки между собой, а зоны несоответствия приурочены к границам перехода от одной категории к другой и почти не затрагивают центральные части контуров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белеванцев В.Г., Чендев Ю.Г.* Картографический анализ социальных и природных явлений на территории Белгородской области в XVIII, XIX и XX вв. // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах. Белгород: “ПОЛИТЕРРА”, 2015. С. 6–16.
2. *Васенёва Э.Г., Васенёв И.И., Щербаков А.П., Шнуг Э., Хансклаус С.* Внутрипольная пестрота почвенного покрова и урожайности в центре черноземной зоны России // Антропогенная эволюция черноземов. Воронеж: ВГУ, 2000. С. 330–362.
3. *Годельман Я.М., Пугаев А.П.* Классификация, систематика и картография структуры почвенного покрова Придунайской равнины // Почвоведение. 1979. № 10. С. 34–45.
4. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2018 году. Росреестр, 2019. 198 с.
5. *Григорьев Г.И.* Элементарная структура почвенного покрова // Бюллетень почвенного института имени В.В. Докучаева. 1975. Вып. VIII. С. 6–16.
6. *Докучаев В.В.* Русский чернозем: Отчет Вольному экономическому обществу. СПб: тип. Деклерона и Евдокимова, 1883. 376 с.
7. *Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Чендев Ю.Г.* Пространственно-временные параметры латеральной миграции твердофазного вещества почв (Белгородская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 9–17.
8. *Жидкин А.П., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Лукин С.В., Заздравных Е.А., Лозбенев Н.И.* Цифровое моделирование строения и степени эродированности почвенного покрова (Прохоровский район Белгородской области) // Почвоведение. 2021 (в печати).
9. *Заздравных Е.А.* Пространственно-временные особенности трансформации пахотных почв лесостепи на юге Среднерусской возвышенности. Дис. ... канд. геогр. наук. Белгород, 2017. 200 с.
10. *Карпачевский Л.О., Яшин И.М.* Итоги первой всероссийской конференции “Лизиметрические исследования почв” // Почвоведение. 1999. № 10. С. 1291–1294.
11. *Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И.* Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени

В.В. Докучаева. 2019. № 100. С. 5–29. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-100-5-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35).

12. *Лукин С.В.* Агрэкологическое состояние и продуктивность почв Белгородской области. Белгород: КОНСТАНТА, 2016. 344 с.

13. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований. М.: Колос, 1973. 48 с.

14. *Пуцаев А.П.* Отображение неоднородности почвенного покрова юга Молдавии на детальных почвенных картах // Почвоведение. 1979. № 3. С. 28–34.

15. *Соловиченко В.Д., Тютюнов С.И., Уваров Г.И.* Методика проведения почвенно-эрозионного обследования склоновых земель Белгородской области. Белгород: “Отчий край”, 2014. 44 с.

16. *Сорокина Н.П.* Статистический метод оценки смывости на примере мощных типичных черноземов Курской опытной станции // Почвоведение. 1966. № 2. С. 91–96.

17. *Сорокина Н.П.* Элементарные почвенные структуры на полях Курской опытной станции // Крупномасштабная картография почв и ее значение в сельском хозяйстве черноземной зоны. Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М.: Почв ин-т им. В.В. Докучаева, 1976. С. 155–173.

18. *Сорокина Н.П.* Динамика почвенного покрова распаханного склона Курской опытной станции за 20-летний период // Региональные модели плодородия почв как основа совершенствования зональных систем земледелия. М., 1988. С. 163–171.

19. *Сорокина Н.П.* Методология составления крупномасштабных агроэкологически ориентированных почвенных карт. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. 159 с.

20. *Сорокина Н.П., Козлов Д.Н.* Опыт цифрового картографирования структуры почвенного покрова // Почвоведение. 2009. № 2. С. 198–210.

21. *Фишман М.И.* Черноземные комплексы и их связь с рельефом на Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 1977. № 5. С. 17–30.

22. *Чендев Ю.Г.* Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене. М.: ГЕОС, 2008. 212 с.

23. *Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Белеванцев В.Г., Жидкин А.П.* Особенности изменения естественной растительности в результате многовекового хозяйственного освоения юга Среднерусской возвышенности // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах. Белгород: “ПОЛИТЕРРА”, 2015. С. 145–155.

24. *Чендев Ю.Г., Петин А.Н.* Изучение и оценка показателей антропогенной деградации природно-ресурсного потенциала на юге

лесостепи Среднерусской возвышенности // Геология, география и глобальная энергия. 2008. № 2 (29). С. 112–121.

25. *Чендев Ю.Г.* Изменение во времени компонентов географической среды Белгородской области. Белгород: Изд-во БелГУ, 1997. 84 с.

26. *Чендев Ю.Г., Петин А.Н.* Естественные изменения и техногенная трансформация компонентов окружающей среды староосвоенных регионов (на примере Белгородской области). М.: МГУ, 2006. 123 с.

27. Элементарные почвообразовательные процессы: Опыт концептуального анализа, характеристика, систематика. М.: Наука, 1992. 184 с.

28. Agricultural Baseline Projections to 2013, Staff Report WAOB-2004-1. Office of the Chief Economist, US Department of Agriculture, 2004.

29. *Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P.* Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling // International Soil and Water Conservation Research. 2019. Vol. 7 (3). P. 203–225. DOI: [10.1016/j.iswcr.2019.05.004](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004).

30. *Angelini M.E., Heuvelink G.B.M.* Including spatial correlation in structural equation modelling of soil properties // Spat. Stat. 2018. Vol. 25. P. 35–51. DOI: [10.1016/j.spasta.2018.04.003](https://doi.org/10.1016/j.spasta.2018.04.003).

31. *Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Kempen B.* Multivariate mapping of soil with structural equation modelling // European J. of Soil Science. 2017. Vol. 68 (5). P. 575–591. DOI: [10.1111/ejss.12446](https://doi.org/10.1111/ejss.12446).

32. *Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Morras H.J.M.* Mapping the soils of an Argentine Pampas region using structural equation modelling // Geoderma. 2016. Vol. 281. P. 102–118. DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.06.031](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.031).

33. *Arrouays D., Mcbratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-forges A.C., Morgan C.L.S. et al.* Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better // Geoderma Regional. 2020. Vol. e00255. DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00255](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255).

34. *Bockheim J.G., Gennadiyev A.N.* The value of controlled experiments in studying soil-forming processes: A review // Geoderma. 2009. Vol. 152. № 3–4. P. 208–217. DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.06.019](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.019).

35. *Bui E.N., Hancock G.J., Wilkinson N.S.* ‘Tolerable’ hillslope soil erosion rates in Australia: Linking science and policy // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2011. Vol. 144. Iss. 1. P. 136–149. DOI: [10.1016/j.agee.2011.07.022](https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.022).

36. *Chaplot V., Lorentz S., Podwojewski P., Jewitt G.* Digital mapping of A-horizon thickness using the correlation between various soil properties and soil apparent electrical resistivity // Geoderma. 2010. Vol. 157. Iss. 3–4. P. 154–164. DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.04.006](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.006).

37. Decision X/2 strategic plan for biodiversity 2011–2020 and the aichi biodiversity targets. Nagoya. 2012. URL: <https://www.cbd.int/sp/>.
38. Digital soil mapping with limited data / A. Hartemink, A. McBratney, L.M. Mendosa-Sanyos (Eds). Springer. 2008. 445 p.
39. *Dotterweich M.* The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation – A global synopsis // *Geomorphology*. 2013. Vol. 201. P. 1–34. DOI: [10.1016/j.geomorph.2013.07.021](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.07.021).
40. *Flanagan D.* Pedotransfer functions for soil erosion models // *Developments in Soil Science*. 2004. Vol. 30. P. 177–193. DOI: [10.1016/S0166-2481\(04\)30011-5](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)30011-5).
41. *Guerra C.A., Pinto-Correia T., Metzger M.J.* Mapping Soil Erosion Prevention Using an Ecosystem Service Modeling Framework for Integrated Land Management and Policy // *Ecosystems*. 2014. Vol. 17. P. 878–889. DOI: [10.1007/s10021-014-9766-4](https://doi.org/10.1007/s10021-014-9766-4).
42. *Lozbenev N., Smirnova M., Bocharnikov M., Kozlov D.* Digital Mapping of Habitat for Plant Communities Based on Soil Functions: A Case Study in the Virgin Forest-Steppe of Russia // *Soil Systems*. 2019. No. 3. P. 19. DOI: [10.3390/soilsystems3010019](https://doi.org/10.3390/soilsystems3010019).
43. *Ma Y., Minasny B., Malone B.P., Mcbratney A.* Pedology and digital soil mapping (DSM) // *Eur. J. of Soil Sci*. 2019. Vol. 70. P. 216–235. DOI: [10.1111/ejss.12790](https://doi.org/10.1111/ejss.12790).
44. *Martinez-Mena M., Carrillo-Lopez E., Boix-Fayos C., Almagro M., Garcia Franco N., Diaz-Pereira E., Montoya I., de Vente J.* Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems // *Catena*. 2020. Vol. 187. P. 104352. DOI: [10.1016/j.catena.2019.104352](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104352).
45. *McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B.* On digital soil mapping // *Geoderma*. 2003. Vol. 117. P. 3–52. DOI: [10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
46. *Minasny B., McBratney A.* Digital soil mapping: a brief history and some lessons // *Geoderma*. 2016. Vol. 264. P. 301–311. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.07.017](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017).
47. *Sommer M., Augustin J., Kleber M.* Feedbacks of soil erosion on SOC patterns and carbon dynamics in agricultural landscapes – The CarboZALF experiment // *Soil and Tillage Research*. 2016. Vol. 156. P. 182–184. DOI: [10.1016/j.still.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.015).
48. Thematic Strategy for Soil Protection (COM2006.231). Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions. Brussels,

2006. URL: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/soil-thematic-strategy-com-2006-231>.

49. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development, 2015. URL:

<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.

50. Van der Kroef I., Koszinski S., Grinat M. Digital mapping of buried soil horizons using 2D and pseudo-3D geoelectrical measurements in a ground moraine landscape // Eur J Soil Sci. 2020. Vol. 71. P. 10–26. DOI: [10.1111/ejss.12842](https://doi.org/10.1111/ejss.12842).

51. Van Oost K., Govers G., Desmet P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage // Landscape Ecology. 2000. Vol. 15. P. 577–589. DOI: [10.1023/A:1008198215674](https://doi.org/10.1023/A:1008198215674).

52. Van Rompay A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. Vol. 26 (11). P. 1221–1236. DOI: [10.1002/esp.275](https://doi.org/10.1002/esp.275).

53. Vanwalleghem T., Gomez J.A., Infante Amate J., Gonzalez de Molina, M., Vanderlinden, K., Guzman G., Laguna A., Giraldez J.V. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene // Anthropocene. 2017. Vol.17. P.13–39. DOI: [10.1016/j.ancene.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.01.002).

54. Webster R., Burrough P.A. Multiple discriminant analysis in soil survey // European Journal of Soil Science. 1974. Vol. 25 (1). P. 120–134

55. Yaghoobi A., Khalilimoghdam B., Saedi T., Rahnama M. The effect of enclosure management on the reduction of SOC loss due to splash erosion in gypsiferous soils in Southwestern Iran // Geoderma. 2018. Vol. 319. P. 34–42. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.12.037](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.037).

REFERENCES

1. Belevancev V.G., Chendev Ju.G., Problemy prirodopol'zovaniya i jekologicheskaja situacija v Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh stranah (Cartographic analysis of social and natural phenomena on the territory of the Belgorod region in the 18th, 19th and 20th centuries), In: *Problemy prirodopol'zovaniya i jekologicheskaja situacija v Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh stranah* (Problems of nature management and the ecological situation in European Russia and neighboring countries), Belgorod: “POLITERRA”, 2015. pp. 6–16.

2. Vaseneva E.G., Vasenev I.I., Shcherbakov A.P., Shnug E., Khansklaus S., Vnutripol'naya pestrota pochvennogo pokrova i urozhainosti v tsentre

chernozemnoi zony Rossii (Intra-field variegation of soil cover and yield in the center of the chernozem zone of Russia), In: *Antropogennaya evolyutsiya chernozemov* (Anthropogenic evolution of chernozems), Voronezh: VGU, 2000, pp. 330–362.

3. Godel'man Ya.M., Pugaev A.P., Klassifikatsiya, sistematika i kartografiya struktury pochvennogo pokrova Pridunaiskoi ravniny (Classification, taxonomy and cartography of the soil cover pattern of the Danube plain), *Pochvovedenie*, 1979, No. 10, pp. 34–45.

4. *Gosudarstvennyi (natsional'nyi) доклад o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu* (State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2018), Rosreestr, 2019, 198 p.

5. Grigor'ev G.I., Elementarnaya struktura pochvennogo pokrova (Elementary soil cover pattern), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1975, Vol. VIII, pp. 6–16.

6. Dokuchaev V.V., *Russkii chernozem: (Otchet Vol'nomu ekonomicheskomu obshchestvu)* (Russian chernozem: (Report to the Free Economic Society)), St. Petersburg: tip. Deklerona i Evdokimova, 1883, 376 p.

7. Zhidkin A.P., Gennadiev A.N., Koshovskii T.S., Chendev Yu.G., Prostranstvenno-vremennye parametry lateral'noi migratsii tverdogaznogo veshchestva pochv (Belgorodskaya oblast') (Spatio-temporal parameters of the lateral migration of solid-phase soil matter (Belgorod Region), *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*, 2016, No. 3, pp. 9–17.

8. Zhidkin A.P., Smirnova M.A., Gennadiev A.N., Lukin S.V., Zazdravnykh E.A., Lozbenev N.I., Digital modeling of pattern and erosion degree of soil cover pattern (Prokhorovskij district of Belgorod region), *Eurasean soil science*, 2021 (in print).

9. Zazdravnykh E.A., *Prostranstvenno-vremennye osobennosti transformatsii pakhotnykh pochv lesostepi na yuge Srednerusskoi vozvyshennosti: Dis. ... kand. geogr. nauk* (Spatial-temporal features of the transformation of arable soils of the forest-steppe in the south of the Central Russian Upland, Cand. geogr. sci. thesis), Belgorod, 2017, 200 p.

10. Karpachevskii L.O., Yashin I.M., Itogi pervoi vserossiiskoi konferentsii “Lizimetricheskie issledovaniya pochv” (Results of the first Russian conference “Lysimetric studies of soils”), *Pochvovedenie*, 1999, No. 10, pp. 1291–1294.

11. Kozlov D.N., Zhidkin A.P., Lozbenev N.I., Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern foreststeppe of the Central Russian Upland), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 100, pp. 5–35, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-100-5-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35).

12. Lukin S.V., *Agroekologicheskoe sostoyanie i produktivnost' pochv Belgorodskoi oblasti* (Agroecological state and soil productivity of the Belgorod region), Belgorod: KONSTANTA, 2016, 344 p.
13. *Obshchesoyuznaya instruktsiya po pochvennym obsledovaniyam i sostavleniyu krupnomasshtabnykh pochvennykh kart zemlepol'zovaniy* (USSR Instruction on Soil Investigations and Compilation of Large-Scale Soil Maps of Land Use), Moscow: Kolos, 1973, 48 p.
14. Pugaev A.P., *Otobrazhenie neodnorodnosti pochvennogo pokrova yuga Moldavii na detal'nykh pochvennykh kartakh* (Display of soil cover heterogeneity in the south of Moldova on detailed soil maps), *Pochvovedenie*, 1979, No. 3, pp. 28–34.
15. Solovichenko V.D., Tyutyunov S.I., Uvarov G.I., *Metodika provedeniya pochvenno-erozionnogo obsledovaniya sklonovykh zemel' Belgorodskoi oblasti* (Methodology for soil erosion survey of the slope lands of the Belgorod region), Belgorod: “Otkhii krai”, 2014, 44 p.
16. Sorokina N.P., *Statisticheskii metod otsenki smytosti na primere moshchnykh tipichnykh chernozemov Kurskoi opytnoi stantsii* (Statistical method for assessing washout on the example of powerful typical chernozems of the Kursk experimental station), *Pochvovedenie*, 1966, No. 2, pp. 91–96.
17. Sorokina N.P., *Elementarnye pochvennye struktury na polyakh Kurskoi opytnoi stantsii* (Elementary soil structures in the fields of the Kursk Experimental Station), *Krupnomasshtabnaya kartografiya pochv i ee znachenie v sel'skom khozyaistve chernozemnoi zony* (Large-scale soil mapping and its importance in agriculture in the chernozem zone), *Nauchnye trudy Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* (Scientific works of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), Moscow, 1976. pp. 155–173.
18. Sorokina N.P., *Dinamika pochvennogo pokrova raspakhannogo sklona Kurskoi opytnoi stantsii za 20-letnii period* (Dynamics of the soil cover of the plowed slope of the Kursk experimental station over a 20-year period), In: *Regional'nye modeli plodorodiya pochv kak osnova sovershenstvovaniya zonal'nykh sistem zemledeliya* (Regional models of soil fertility as the basis for improving zonal farming systems), Moscow, 1988, pp. 163–171.
19. Sorokina N.P., *Metodologiya sostavleniya krupnomasshtabnykh agroekologicheskii orientirovannykh pochvennykh kart* (Methodology for the compilation of large-scale agroecologically oriented soil maps), Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2006, 159 p.
20. Sorokina N.P., Kozlov D.N., *Experience in digital mapping of soil cover patterns*, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, pp. 182–193, DOI: [10.1134/S1064229309020094](https://doi.org/10.1134/S1064229309020094).
21. Fishman M.I., *Chernozemnye kompleksy i ikh svyaz' s rel'efom na Srednerusskoi vozvyshennosti* (Chernozem complexes and their relationship

with the relief on the Central Russian Upland), *Pochvovedenie*, 1977, No. 5, pp. 17–30.

22. Chendev Yu.G., *Evoljutsiya lesostepnykh pochv Srednerusskoi vozvyshehnosti v golotsene* (Evolution of forest-steppe soils of the Central Russian Upland in the Holocene), Moscow: GEOS, 2008. 212 p.

23. Chendev Yu.G., Gennadiev A.N., Belevancev V.G., Zhidkin A.P., *Osobennosti izmenenija estestvennoj rastitel'nosti v rezul'tate mnogovekovogo hozjajstvennogo osvoenija juga Srednerusskoj vozvyshehnosti* (Features of changes in natural vegetation as a result of centuries-old economic development of the south of the Central Russian Upland), In: *Problemy prirodopol'zovanija i jekologicheskaja situacija v Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh stranah* (Problems of natural resources and the ecological situation in European Russia and neighboring countries), Belgorod: "POLITERRA", 2015, pp. 145–155.

24. Chendev Ju.G., Petin A.N., *Izuchenie i ocenka pokazatelej antropogennoj degradacii prirodno-resurnogo potenciala na juge lesostepi Srednerusskoj vozvyshehnosti* (Study and assessment of indicators of anthropogenic degradation of natural resource potential in the south of the forest-steppe of the Central Russian Upland), *Geologija, geografija i global'naja jenergija*, 2008, No. 2 (29), pp. 112–121.

25. Chendev Yu.G., *Izmenenie vo vremeni komponentov geograficheskoj sredy Belgorodskoj oblasti* (Changes in time of the components of the geographic environment of the Belgorod region), Belgorod: Izd-vo BelGU, 1997, 84 p.

26. Chendev, Yu.G., Petin A.N., *Estestvennye izmenenija i tehnogennaja transformacija komponentov okruzhajushhej sredy staroosvoennyh regionov (na primere Belgorodskoj oblasti)* (Natural changes and technogenic transformation of environmental components of old-developed regions (on the example of the Belgorod region).), Moscow: MSU, 2006, 123 p.

27. *Elementarnye pochvoobrazovatel'nye protsessy: Opyt kontseptual'nogo analiza, kharakteristika, sistematika* (Elementary soil-forming processes: Experience of conceptual analysis, characteristics, taxonomy), Moscow: Nauka, 1992, 184 p.

28. *Agricultural Baseline Projections to 2013*, Staff Report WAOB-2004-1, Office of the Chief Economist, US Department of Agriculture, 2004.

29. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P., Using the USLE : Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling, *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, Vol. 7 (3), pp. 203–225, DOI: [10.1016/j.iswcr.2019.05.004](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004).

30. Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Including spatial correlation in structural equation modelling of soil properties, *Spat. Stat.*, 2018, Vol. 25, pp. 35–51, DOI: [10.1016/j.spasta.2018.04.003](https://doi.org/10.1016/j.spasta.2018.04.003).

31. Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Multivariate mapping of soil with structural equation modelling, *European J. of Soil Science*, 2017, Vol. 68 (5), pp. 575–591, DOI: [10.1111/ejss.12446](https://doi.org/10.1111/ejss.12446).
32. Angelini M.E., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Morras H.J.M., Mapping the soils of an Argentine Pampas region using structural equation modelling, *Geoderma*, 2016, Vol. 281, pp. 102–118, DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.06.031](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.031).
33. Arrouays D., Mcbratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-forges A.C., Morgan C.L.S. et al., Impressions of digital soil maps : The good , the not so good, and making them ever better, *Geoderma Regional*, 2020, Vol. e00255, DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00255](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255).
34. Bockheim J.G., Gennadiyev A.N., The value of controlled experiments in studying soil-forming processes: A review, *Geoderma*, 2009, Vol. 152, No. 3–4, pp. 208–217, DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.06.019](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.019).
35. Bui E.N., Hancock G.J., Wilkinson N.S., ‘Tolerable’ hillslope soil erosion rates in Australia: Linking science and policy, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, Vol. 144, Issue 1, pp. 136–149, DOI: [10.1016/j.agee.2011.07.022](https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.022).
36. Chaplot V., Lorentz S., Podwojewski P., Jewitt G., Digital mapping of A-horizon thickness using the correlation between various soil properties and soil apparent electrical resistivity, *Geoderma*, 2010, Vol. 157, Iss. 3–4, pp. 154–164, DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.04.006](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.006).
37. Decision X/2 strategic plan for biodiversity 2011–2020 and the aichi biodiversity targets, Nagoya, 2012, URL: <https://www.cbd.int/sp/>.
38. Hartemink A., McBratney A., Mendosa-Sanyos L.M. (Eds), *Digital soil mapping with limited data*, Springer, 2008, 445 p.
39. Dotterweich M., The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation – A global synopsis, *Geomorphology*, 2013, Vol. 201, P. 1–34, DOI: [10.1016/j.geomorph.2013.07.021](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.07.021).
40. Flanagan D., Pedotransfer functions for soil erosion models, *Developments in Soil Science*, 2004, Vol. 30, pp. 177–193, DOI: [10.1016/S0166-2481\(04\)30011-5](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)30011-5).
41. Guerra C.A., Pinto-Correia T., Metzger M.J., Mapping Soil Erosion Prevention Using an Ecosystem Service Modeling Framework for Integrated Land Management and Policy, *Ecosystems*, 2014, Vol. 17, pp. 878–889, DOI: [10.1007/s10021-014-9766-4](https://doi.org/10.1007/s10021-014-9766-4).
42. Lozbenev N., Smirnova M., Bocharnikov M., Kozlov D. Digital Mapping of Habitat for Plant Communities Based on Soil Functions: A Case Study in the Virgin Forest-Steppe of Russia, *Soil Systems*, 2019, No. 3, 19 p., DOI: [10.3390/soilsystems3010019](https://doi.org/10.3390/soilsystems3010019).

43. Ma Y., Minasny B., Malone B.P., Mcbratney A., Pedology and digital soil mapping (DSM), *Eur. J. of Soil Science*, 2019, Vol. 70, pp. 216–235, DOI: [10.1111/ejss.12790](https://doi.org/10.1111/ejss.12790).
44. Martinez-Mena M., Carrillo-Lopez E., Boix-Fayos C., Almagro M., Garcia Franco N., Diaz-Pereira E., Montoya I., de Vente J., Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems, *Catena*, 2020, Vol. 187, 104352. DOI: [10.1016/j.catena.2019.104352](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104352).
45. McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B., On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, Vol. 117, pp. 3–52, DOI: [10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
46. Minasny B., McBratney A., Digital soil mapping: a brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, pp. 3013–311, DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.07.017](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017).
47. Sommer M., Augustin J., Kleber M. Feedbacks of soil erosion on SOC patterns and carbon dynamics in agricultural landscapes – The CarboZALF experiment, *Soil and Tillage Research*, 2016, Vol. 156, pp. 182–184, DOI: [10.1016/j.still.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.015).
48. Thematic Strategy for Soil Protection (COM2006.231). Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions. Brussels, 2006, URL: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/soil-thematic-strategy-com-2006-231>.
49. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development, 2015, URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.
50. Van der Kroef I., Koszinski S., Grinat M., Digital mapping of buried soil horizons using 2D and pseudo-3D geoelectrical measurements in a ground moraine landscape, *Eur J Soil Sci*, 2020, Vol. 71, pp. 10–26, DOI: [10.1111/ejss.12842](https://doi.org/10.1111/ejss.12842).
51. Van Oost K., Govers G., Desmet P., Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage, *Landscape Ecology*, 2000, Vol. 15, pp. 577–589, DOI: [10.1023/A:1008198215674](https://doi.org/10.1023/A:1008198215674).
52. Van Rompay A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, Vol. 26 (11), pp. 1221–1236, DOI: [10.1002/esp.275](https://doi.org/10.1002/esp.275).
53. Vanwalleghem T., Gomez J.A., Infante Amate J., Gonzalez de Molina, M., Vanderlinden, K., Guzm an G., Laguna A., Giraldez J.V., Impact of historical land use and soil management change on ´ soil erosion and agricultural

- sustainability during the Anthropocene, *Anthropocene*, 2017, Vol. 17, P.13–39, DOI: [10.1016/j.ancene.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.01.002).
54. Webster R., Burrough P.A., Multiple discriminant analysis in soil survey, *European Journal of Soil Science*, 1974, Vol. 25 (1), pp. 120–134.
55. Yaghobi A., Khalilimoghadam B., Saedi T., Rahnama M., The effect of exclosure management on the reduction of SOC loss due to splash erosion in gypsiferous soils in Southwestern Iran, *Geoderma*, 2018, Vol. 319, pp. 34–42, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.12.037](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.037).