

## ТРАДИЦИОННОЕ И ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОЧВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА “СМОЛЕНСКОЕ ПООЗЕРЬЕ”

© 2025 г. А. И. Корнилова<sup>a, b, \*</sup>, М. А. Смирнова<sup>b</sup>, И. Н. Семенов<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева РАН,  
ул. Профсоюзная, 84, стр. 14, Москва, 117997 Россия

<sup>b</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: kulikovanastya2001@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.05.2024 г.

После доработки 25.09.2024 г.

Принята к публикации 26.09.2024 г.

На участок площадью 8.6 км<sup>2</sup> в центральной части национального парка “Смоленское Поозерье” составлены почвенные карты масштаба 1 : 25000 в методах традиционной и цифровой почвенной картографии (ЦПК) с учетом показателей, характеризующих рельеф, растительность, время и антропогенный фактор почвообразования, и проведено сравнение полученных результатов. На обеих картах рассматриваемой территории преобладают серогумусовые постагрогенные (Umbric Cambisols (Arenic, Aric)) почвы, что связано с сельскохозяйственным использованием в прошлом и реградацией старопашотных почв. Меньшие территории занимают аллювиальные торфяные (Histic Fluvisols) и дерново-подзолистые постагрогенные (Albic Glossic Retisols (Aric, Loamic)) почвы. Общая точность карты, составленной методом ЦПК, составила 57%. Ведущими факторами дифференциации, используемыми при экспертном и цифровом картографировании, оказались топографический индекс влажности и лесотаксационная карта. Методами ЦПК лучше всего, с точностью 100 и 86%, предсказано распространение аллювиальных торфяных почв (Histic Fluvisols) и агроземов (Arenosols (Aric)), приуроченных к торфяной залежи и пашням. Расположение торфяных (Fibric Histosols) почв и торфяно-подзолов (Histic Albic Podzols (Arenic)) предсказано наименее точно (0%). Точность предсказания расположения альфегумусовых (Podzols), текстурно-дифференцированных (Retisols), органо-аккумулятивных (Umbric Cambisols), перегнойно-глеевых (Histic Gleysols), аллювиальных гумусовых глеевых (Gleyic Fluvisols) почв варьировала в пределах 50–63%. Цифровой метод на 63% воспроизвел результат традиционного картографирования.

**Ключевые слова:** почвенные ареалы, геоинформационные системы, сравнительно-географический метод, машинное обучение, предикторы, случайные леса, бореальные ландшафты

**DOI:** 10.31857/S0032180X25020016, **EDN:** CPFZGH

### ВВЕДЕНИЕ

Почвенные карты представляют собой синтез теоретических и прикладных знаний, аккумулируют информацию о связях между компонентами ландшафта [4, 29, 44, 50]. Вопросы разработки методов картографирования почвенного покрова не теряют значимости в почвоведении. Традиционный (синоним — экспертный) факторно-генетический подход, разработанный В.В. Докучаевым [4], актуален до сих пор и используется для отображения почвенного покрова на тематических картах [28]. В дальнейшем

под понятием “экспертная картография” в настоящей работе подразумевается подход, в котором основная роль в выявлении пространственных взаимосвязей между почвой и факторами ее образования отводится специалисту.

С конца 1990-х гг. благодаря внедрению цифровых технологий развился новый подход к созданию карт — цифровая почвенная картография (ЦПК) [57], основанный на создании численных моделей взаимосвязи между пространственными данными о почве и/или ее свойствах и данными о факторах почвообразования (так называемыми

предикторами) с минимальным влиянием субъективных (невоспроизводимых и не позволяющих в итоге оценить погрешность получаемого результата) операций специалиста [9, 27, 47, 50]. В сущности новый подход представляет собой синтез теоретических и фундаментальных положений почвоведения и новых информационных технологий [44]. В рамках ЦПК используют растровые модели, состоящие из элементарных территориальных единиц (ячеек сетки) и регулярно покрывающие всю территорию с фиксированным шагом [9, 30, 50, 51]. К таким моделям применяют геостатистические методы с функцией интерполяции либо методы машинного обучения, выявляющие связи между почвенными и ландшафтными данными.

Суть подходов экспертного и цифрового почвенного картографирования заключается в поиске корреляций названия почвы с факторами почвообразования (факторно-индикационными характеристиками по [1, 2] или почвенно-ландшафтными связями по [5, 9, 29, 44]), при взаимодействии которых формируется определенная почва. Распространение почв в пределах картографируемой территории определяют на основе точек опробования и дополнительной информации о факторах почвообразования. Основное различие двух подходов проявляется в выявлении взаимосвязей между почвой и факторами ее образования [56], выражающееся через: 1) выбор и ранжирование по значимости вклада информации о компонентах ландшафта; 2) оконтуривании почвенных ареалов. В традиционном картографировании первоначально устанавливают гипотезы о формировании связей в ландшафте, затем их проверяют или опровергают при полевых и/или камеральных исследованиях. Далее почвовед-картограф выявляет связи. При работе с цифровым методом пользователь часто имеет дело с готовыми наборами данных, а взаимосвязь устанавливается посредством геостатистических методов и/или алгоритмов машинного обучения [27].

При любом подходе составления почвенной карты существуют ограничения, связанные с упрощением сложной и многокомпонентной системы, а также имеющимся массивом фактических данных о почвах и вспомогательных характеристиках о ведущих факторах дифференциации почвенного покрова. Почвенно-ландшафтные связи оценивают в экспертной модели (под данным термином подразумевается выбор источников и анализ связей, формулируемых почвоведом-картографом) и цифровой модели (под термином понимается формирование единой базы растровых данных с определенными факторно-индикационными характеристиками посредством цифрового алгоритма) с использованием всей доступной информации о факторах почвообразования с максимально возможной детализацией. Отсутствие данных или их низкое пространственное разрешение повышает риск получения неполного

учета факторов, исключения из итоговой модели данных о компонентах, связь с которыми ошибочно не была выявлена в виду недостатка или неудовлетворительного качества исходных материалов, и в итоге — заниженной точности модели.

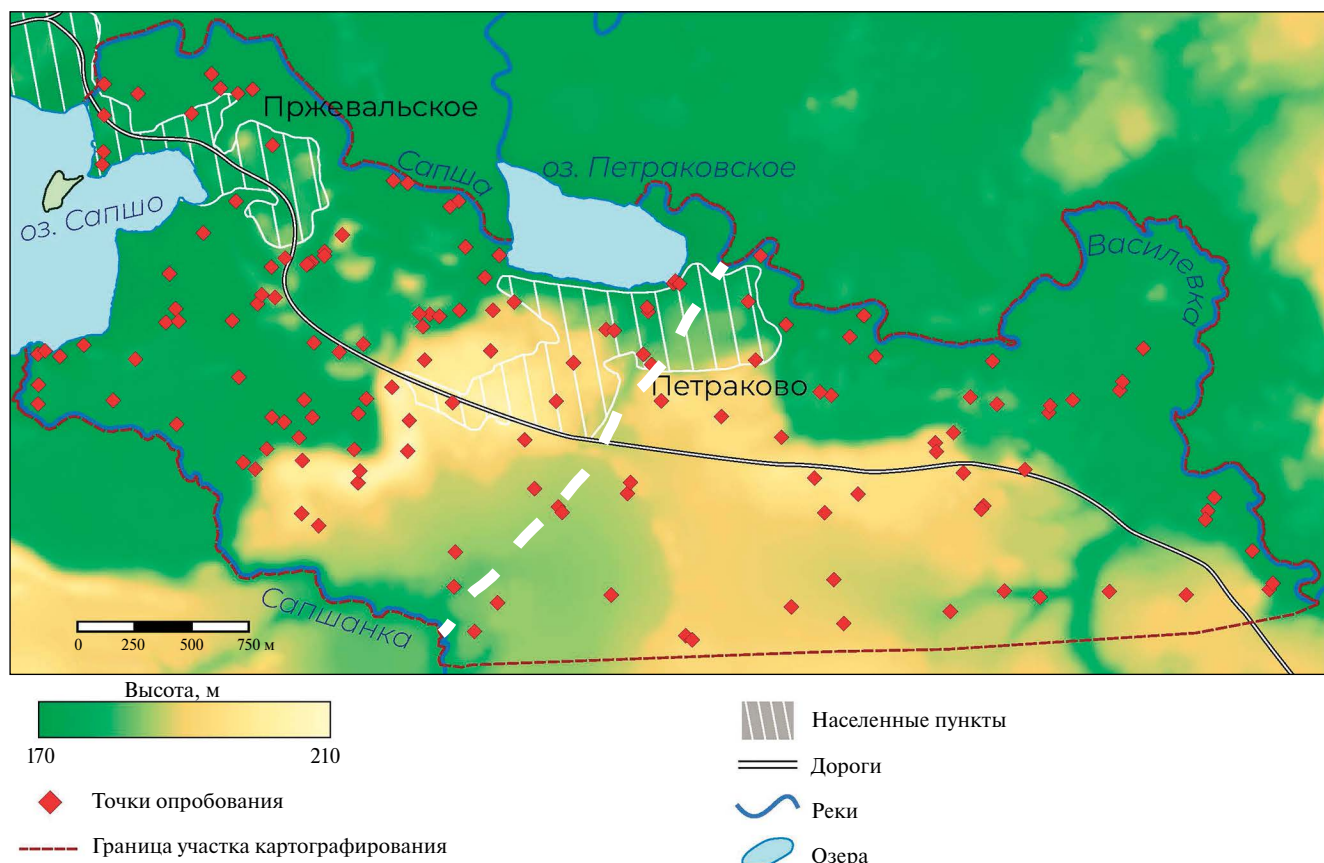
Цель работы — сравнение результатов двух подходов к картографированию почв на участке преимущественного распространения песчаных и супесчаных материнских пород в национальном парке (НП) “Смоленское Поозерье”, созданном в первую очередь для сохранения уникальных водно-болотных экосистем, поскольку ранее в его пределах активно вели лесозаготовку и сельскохозяйственную деятельность. В результате сформировались разнообразные антропогенно-преобразованные почвы, в том числе на разных стадиях постагрогенной регрессии [30]. На всю территорию НП составлена почвенная карта масштаба 1 : 150 000 [34] и на небольшой участок в его западной части с широким распространением суглинистых отложений — карта масштаба 1 : 25 000 [14]. В задачи данного исследования входило:

- 1) выявление основных факторов дифференциации почвенного покрова, а также создание экспертной и цифровой моделей почвенно-ландшафтных связей;
- 2) картографирование, сопоставление и анализ пространственного строения почвенного покрова, отображенного на почвенных картах, созданных независимо двумя методами;
- 3) сравнение двух подходов к картографированию почв в пределах национального парка на участках с разной степенью заболоченности и соотношением пород легкого и тяжелого гранулометрического состава.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

**Объектом исследования** служил почвенный покров участка площадью 8,6 км<sup>2</sup>, вытянутого с запада на восток на 5 км и с севера на юг — на 2 км и включающего пос. Петраково, расположенный в центральной части НП (рис. S1). С севера участок ограничен долинами рек Сапша и Василевка и оз. Петраковское, с юга — нежилой д. Гуки, с запада — долиной р. Сапшанка и оз. Сапшо, с востока — долиной р. Василевка (рис. 1). Средние абсолютные высоты составляют 180–190 м, достигая 207 и 170 м на конечно-ледниковых образованиях и поймах рек и озер соответственно. Изучаемый участок находится в пределах южной — юго-западной части Западно-Двинской низменности.

На территории НП широко распространены двучлены [17]: четвертичные палево-желтые покровные супеси мощностью не более 40–60 см, занимающие водораздельные поверхности, которые залегают на песках [19, 26]. В западной части



**Рис. 1.** Карта фактического материала. Белая пунктирная линия отделяет западную и восточную части ключевого участка, отличающиеся по степени расчлененности рельефа и частоте заложения разрезов.

участка озовые гряды и камовые холмы, сложенные разнотернистыми песчаными породами с включениями щебня и гальки, чередуются с котловинами, занятыми торфяниками. На таких территориях доминируют серогумусовые и альфегумусовые почвы [34]. Суглинки встречаются только на юге картографируемого участка, которым приурочены массивы текстурно-дифференцированных почв [34]. В поймах и на террасах рек распространены аллювиальные суглинки и пески, реже встречаются болота с торфом разной степени разложения и ботанического состава [25]. В таких условиях формируются почвы гидроморфного ряда.

НП расположен в зоне южной тайги, на границе хвойных и широколиственных лесов. Лесные массивы занимают около 74% его территории [25]. Так как вплоть до 1980-х гг. здесь вели промышленные рубки, то сейчас преобладают, в том числе на рассматриваемом участке, мелколиственные и хвойно-мелколиственные леса из березы обыкновенной (*Betula pendula*) и осины обыкновенной (*Populus tremula*), березово-еловые леса с примесью небольшого количества широколиственных пород, преимущественно липы сердцевидной (*Tilia*

*cordata*). Сосняки из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) приурочены к песчаным и супесчаным породам. Ельники из ели обыкновенной (*Picea abies*) произрастают на песчаных и легкосуглинистых породах [34]. Условно коренные хвойные и хвойно-широколиственные леса распространены в северной и северо-восточной части НП локально, в удалении от мест активной хозяйственной деятельности в прошлом [11]. В межрядовых понижениях распространены верховые и переходные болота с сосняками сфагновыми. На переходных формах мезорельефа от склонов к озерным и речным террасам, а также на самих террасах образуются заросли из серой и черной ольхи (*Alnus incana* и *A. glutinosa*), а на наиболее влажных участках — переходные и низинные болота. Для первых характерна смешанная растительность верховых и низинных болот — кустарнички и осиново-березовые леса, для вторых — травянисто-кустарничковая растительность из различных видов осок (*Carex acutiformis*, *C. caryophyllea*, *C. acuta*), тростника (*Phragmites australis*), камыша (*Scirpus sylvaticus*) и вейника (*Calamagrostis arundinacea*).

Луга в основном заливные. Кустарниковые и ивняковые (*Salix caprea*, *S. pentandra*) поросли чаще заболочены.

Следы пребывания человека в пределах Смоленской области датируются I тысячелетием до н.э. [17]. В XVIII в. половина территории Смоленской губернии распаивалась. Упадок сельского хозяйства на территории НП начался в 1940-е гг. К 1990 г. около 40% заброшенных сельхозземель покрылись лесом. За следующие 25 лет площадь лесных массивов прироста на 18% преимущественно за счет мелколиственных и сосновых лесов [11]. В результате на исследуемом участке широко распространены постагрогенные почвы, находящиеся на различных стадиях восстановления [30, 35].

**Полевые работы.** Точки опробования (всего 142) выбраны предварительно на основе собранных картографических материалов [6, 21–23] и литературных данных [10, 12, 15, 16, 25] так, чтобы охватить наиболее разнообразные сочетания факторов почвообразования, в том числе с учетом катенарного подхода.

При диагностике почв особое внимание уделено характеру границы и перехода почвенных горизонтов. Гранулометрический состав определяли методом шнура в верхнем минеральном горизонте почв. В западной части участка с более расчлененным рельефом разрезы закладывали ближе друг к другу. Восточная часть участка более однородна по рельефу: на юге представлена протяженным участком пологоволнистой равнины, на севере и юго-востоке — надпойменной террасой и поймой р. Василевка.

**Материалы для составления почвенных карт.** Картографирование выполнено в масштабе 1 : 25 000. В построении обеих почвенных карт использовали полевые материалы и информацию о факторах почвообразования (табл. S1). Для учета в цифровой модели пространственных данных источники предварительно растеризованы и приведены к единому разрешению с размером пикселя 30 × 30 м в соответствии с рекомендациями [50]. Далее по цифровой модели рельефа (ЦМР) в программе SAGA GIS рассчитано 13 морфометрических характеристик рельефа. Нормализованные вегетационные индексы (NDVI) рассчитаны по летнему (11.06.2020) и зимнему (11.02.2021) снимкам Sentinel-2 в программе QGIS 3.16 для дифференциации растительности по аналогии с другими работами, в которых NDVI применяли для функционального зонирования городов [33, 37, 42] и оценки растительного покрова сельских территорий [7].

Согласно картографическим [21, 24] и литературным источникам [25], на картографируемой территории среди почвообразующих пород доминируют породы легкого гранулометрического состава. Суглинки распространены фрагментарно и

на крупномасштабных почвенных картах совхозов [23] отображены как включения в едином контуре с песчаными породами.

**Методика составления экспертной (традиционной) карты.** Традиционная методика создания почвенной карты базировалась на факторном подходе. Границы между почвенными ареалами проведены согласно выдвинутой гипотезе о формировании одинаковых почв в схожих ландшафтных условиях. Согласно имеющимся полевым описаниям, в количестве 142, выделено 8 почвенных групп. Названия даны согласно российской [8] и международной почвенной классификации [45] (далее цифры в скобках — количество описаний):

1. Подзолы (Albic Podzols (Arenic), 15) и дерново-подзолы (Umbric Albic Podzols (Arenic), 6) приурочены к склонам конечно-ледниковых образований и водно-ледниковой равнины, поэтому при их отрисовке учитывалось положение в рельефе преимущественно по значениям индекса превышений высоты точки в окрестности 250 м (topographic positional index — TPI). Ареалы дерново-подзолов постагрогенных (Umbric Albic Podzols (Arenic, Aric), 3) определены по разновременным космическим снимкам: при наличии зарастания открытых луговых пространств древесными породами с 1970 по 2021 гг. Природные и агропочвы данного отдела объединены в один контур.

2. Дерново-подзолистые постагрогенные почвы (Albic Glossic Retisols (Aric, Loamic, Ochric), 6) выделены по участкам распространения хвойно-широколиственных лесов, отмеченных на лесотаксационной карте, так как сохранили признаки бывшей распашки в виде неестественно большой мощности однородного по окраске гумусового горизонта с ровной нижней границей и резким переходом.

3. Серогумусовые (Umbric Cambisols (Arenic), 20) и серогумусовые постагрогенные почвы (Umbric Cambisols (Arenic, Aric), 22) объединены в одну группу по причине сложности разделения на основе имеющихся источников пространственных данных. Контуров почв проведены по границам автономных позиций в пределах конечно-ледниковых образований, водно-ледниковой равнине на основе TPI в окрестности 250 м. В выделении постагрогенных почв учитывали зарастающие поля по разновременным космическим снимкам.

4. Перегнойно-глеевые почвы (Histic Gleysols (Clayic), 30) приурочены к наиболее низким участкам в рельефе, склонным к накоплению влаги и выделены по 3 морфометрическим характеристикам: TPI в окрестности 250 м и топографическому индексу влажности (topographic wetness index — TWI), глубине вреза долин (Valley depth). Также учитывали ареал серой и черной ольхи по лесотаксационной карте.

5. Торфяные почвы (Fibric Histosols, 11) и торфяно-подзолы (Histic Albic Podzols (Arenic), 7) объединены в одну группу по причине малого количества точек опробования. Преимущественно контуры проводили по локальным понижениям по ЦМР и TWI с учетом распространения ели на лесотаксационной карте.

6. Аллювиальные гумусовые глеевые почвы (Gleyic Fluvisols (Clayic), 13) отмечали на поймах, выделенных по ЦМР.

7. Аллювиальные торфяные почвы (Histic Fluvisols, 5) выделены по контуру торфяного месторождения.

8. Агроземы (Arenosols (Aric), 10) оконтурены по современным космическим снимкам – по обрабатываемым пашням.

Выделы отрисованы в программе QGIS 3.16. Финальная компоновка карты проведена в программе Adobe Illustrator 2022.

Сравнение результатов экспертного картографирования одной и той же территории, выполненного независимо разными экспертами с использованием одинакового массива исходной информации, не получило широкого распространения [59]. Традиционные почвенные карты верифицируют с помощью дополнительного полевого опробования, сравнения полевых описаний с картографическим изображением [18, 48] и использования части (до 30%) исходных фактических данных, которые не применяли для картографирования [59]. Интересным вариантом оценки точности является использование информации о почвенно-ландшафтных связях, взятых от совокупности пикселей одной картографируемой почвенной единицы предварительно растеризованной экспертной карты, и оценки их дисперсии методами ЦПК [58]. Однако эти способы не получили широкого применения, а иные оценки точности и воспроизводимости экспертных карт не разработаны, что считается существенным недостатком традиционного почвенного картографирования [13].

**Методика составления цифровой карты.** Для составления цифровой карты использован метод случайных лесов, реализованный в среде R и представляющий из себя набор деревьев решений, каждое из которых обучается по сгенерированной выборке путем объединения нескольких однородных алгоритмов для повышения точности прогноза (бэггинга) [38]. Среди всего разнообразия методов машинного обучения, используемых в ЦПК за последние 10–15 лет [46], метод случайных лесов считается наиболее популярным и востребованным [36, 46, 53, 55], а также широко применяемым для предсказания разнообразных характеристик [3, 40, 41, 49, 52]. Вершины деревьев расщепляются по случайно выбранному признаку методом случайных подпространств [32]. Благодаря использованию двойной

случайности при построении дерева слабо коррелируют между собой, что повышает точность прогноза. Полученные результаты оценены методом “out-of-bag” [38], который эффективен в пространственном прогнозировании [43].

В модель включен 21 предиктор, среди которых отобраны наиболее важные и независимые. Все пиксели раstra классифицированы относительно одноименных выделенных для традиционной карты 8 почвенных групп. Исключение составляет точечный набор данных: для традиционной карты взяты только полевые описания (142 точки), а для цифровой карты вручную по современному космическому снимку и результатам наземной рекогносцировки добавлены 6 точек агроземов в местах расположения огородов для повышения точности прогноза этой почвенной группы (т.е. использовано 148 точек). Параметры в модели случайных лесов аналогичны использованным в работе [14], посвященной картографированию почв в районе оз. Баклановское (табл. S2).

При составлении модели набор точек разделен на пять подвыборок, из которых попеременно изымали одну часть, а обучение осуществлено на оставшихся четырех частях. Далее с помощью выделенной первой части тестировали модель. Таким образом усредняли ошибки пяти результатов тестирования. Для оценки качества прогноза рассчитана общая, продюсерская и пользовательская точности [54]. По каждому отдельному почвенному ареалу разница между продюсерской и пользовательской точностью заключается в том, что первая вычисляет процент правильно классифицированных точек относительно проверочных данных (тестовой выборки), вторая – процент верно классифицированных точек в рамках заданной пользователем классификации, т.е. вероятность совпадения заданного класса с результатами классификации. Общая точность карты отражает, насколько полученный результат классификации модели, обученной на тестовой выборке, совпадает с фактическими классами, присвоенными человеком перед началом обучения модели.

**Сравнение результатов традиционного и цифрового картографирования.** Обе почвенные карты сравнили попиксельно. Общая экспертная точность получена путем наложения всех выделенных почвенных групп. Точность по каждой из 8 картографируемых единиц получена на основе принятия за 100% общей площади выдела, взятой с традиционной карты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Результат традиционного картографирования.** Среди учитываемых показателей наиболее значимыми факторами, определяющими пространственное положение почвенных ареалов, явились



превышение высоты в окрестностях 250 м, топографический индекс влажности и лесотаксационная карта. Также учет временного фактора с помощью разновременных спутниковых снимков позволил выявить ряд особенностей и закономерностей в распространении почв.

На ключевом участке почвенный покров представлен природными и антропогенно-преобразованные почвами (рис. 2а; табл. S3). В западной и центральной частях участка на вершинах конечно-ледниковых образований под хвойными и хвойно-мелколиственными лесами сформировались органо-аккумулятивные почвы (серогумусовые). На выположенных участках флювиогляциальной равнины и на надпойменных террасах рек под сосновыми и мелколиственными лесами средних стадий восстановления [31, 35] формируются серогумусовые постагрогенные почвы. В замкнутых понижениях под растительностью из серой и черной ольхи, а также в долинах рек и на поймах озер под заболоченными лесами и лугами формируются перегнойно-глеевые почвы. Почвы альфегумусового отдела занимают переходные ландшафтные позиции: природные подзолы и дерново-подзолы распространены в западной и частично в центральных частях участка на склонах конечно-ледниковых образований. Агропочвы (дерново-подзолы постагрогенные) распространены на склонах флювиогляциальной равнины на востоке участка. К выходам суглинистых пород приурочены ареалы дерново-подзолистых постагрогенных почв, занимающие 2% участка.

Соотношение площадей между торфяными почвами с торфяно-подзолами, аллювиальными

серогумусовыми глеевыми и агроземами примерно одинаковое (табл. 1). Торфяно-подзолы занимают нижние части склонов озовых гряд и холмов под увлажненными лесами. Торфяные олиготрофные почвы приурочены к понижениям конечно-ледниковых образований в северо-западной и центральной частях участка. Торфяные эутрофные почвы большей частью представлены в понижениях флювиогляциальной равнины в южной части участка. Аллювиальные серогумусовые глеевые почвы приурочены к поймам рек Василевки и Сапшанки под влажнотравными лугами. По литературным и картографическим источникам, пойма р. Сапша занята торфяным месторождением “Слободское”, поэтому на ней отмечены аллювиальные торфяные почвы (1% от площади участка). От верховий эрозионных форм рельефа до речных пойм прослеживается катерная сопряженность гидроморфных почв: торфяные олиготрофные — перегнойно-глеевые — аллювиальные серогумусовые глеевые или аллювиальные торфяные. Границы распространения агроземов связаны с участками обрабатываемых полей, личными подсобными хозяйствам вблизи населенных пунктов.

На картографируемой территории выделено три района со сложной конфигурацией ареалов:

- 1) на западе расчлененный рельеф с чередованием озовых гряд и камовых холмов обуславливает формирование разнообразных почв;
- 2) на юге из-за литологической неоднородности почвообразующих пород на фоне песчаных и супесчаных альфегумусовых почв появляются суглинистые текстурно-дифференцированные;

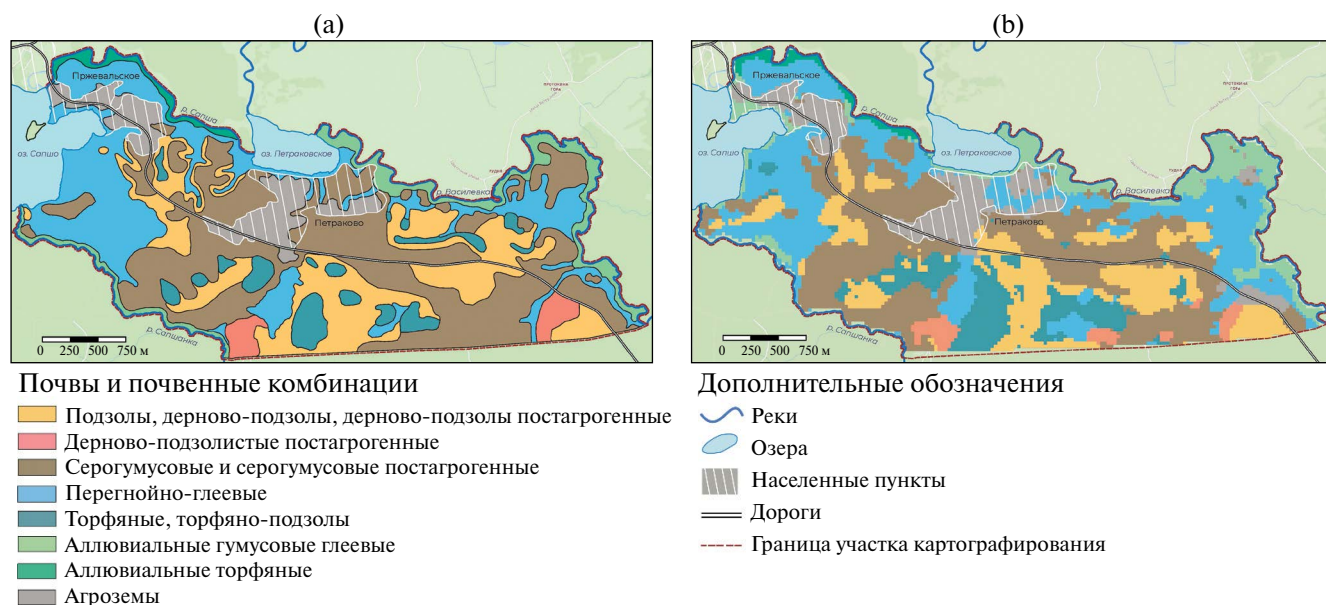


Рис. 2. Почвенные карты, составленные экспертным (традиционным) методом (а) и цифровым методом (б).

**Таблица 1.** Площади, занимаемые почвами на созданных традиционной и цифровой картах

Почвы	Карта	
	экспертная	цифровая
Подзолы, дерново-подзолы и дерново-подзолы постагрогенные	1.7/20	1.3/15
Дерново-подзолистые постагрогенные	0.2/2	0.2/2
Серогумусовые и серогумусовые постагрогенные	3.0/35	2.6/30
Перегноино-глеевые	1.9/22	2.1/24
Торфяные, торфяно-подзолы	0.5/6	0.8/10
Аллювиальные серогумусовые глеевые	0.5/6	0.7/8
Аллювиальные торфяные	0.1/1	0.1/1
Агроземы	0.7/8	0.8/10
Итого	8.6/100	8.6/100

Примечание. Слева от черты — площадь почвенных ареалов, км<sup>2</sup>, справа — % от общей площади участка.

3) на северо-востоке от вершины и волнистого склона холма через надпойменную террасу к пойме р. Василевка серогумусовые и серогумусовые постагрогенные почвы резко сменяются торфяно-подзолами и торфяными эутрофными.

Обширная надпойменная терраса, представленная зарастающими лугами и березняками на бывших пашнях, осложнена замкнутыми понижениями, что объясняет соседство в ее пределах двух почвенных ареалов: серогумусовых постагрогенных и перегноино-глеевых почв.

**Результат цифрового картографирования.** Общая оценка качества моделирования составила 57%. По линейной регрессии положение почвенных групп наиболее значимо определяют следующие предикторы:

1) Распространение луговой растительности и личных подсобных хозяйств определяет границы пашни и, соответственно, агроземов;

2) По значениям зимнего NDVI отделены участки с хвойной растительностью (NDVI > 0.4) от мелколиственных лесов и лугов (NDVI = 0.1–0.4). Выявлена значимая взаимосвязь между участками распространения мелколиственных лесов и лугов с одной стороны и перегноино-глеевыми и аллювиальными гумусовыми почвами с другой стороны соответственно. В пределах картографируемого участка по значениям индекса от –0.1 до +0.1

**Таблица 2.** Точность предсказания положения почв на цифровой карте, %

Почвы	Точность		
	пользовательская	продюсерская	экспертная
Подзолы, дерново-подзолы и дерново-подзолы постагрогенные	50	38	45
Дерново-подзолистые постагрогенные	50	17	38
Серогумусовые и серогумусовые постагрогенные	63	77	61
Перегноино-глеевые	52	87	72
Торфяные, торфяно-подзолы	0	0	58
Аллювиальные гумусовые глеевые	56	39	75
Аллювиальные торфяные	100	80	90
Агроземы	86	60	83

хорошо выделяется застройка, к которой тяготеют агроземы;

3) Ареал торфяной залежи определяет положение аллювиальных торфяных почв на пойме р. Сапша;

4) Распространение сосняков и ельников детерминирует ареал альфегумусовых и серогумусовых почв;

5) По лесотаксационной карте, содержащей информацию об основных древесных породах, уточнены границы перегноино-глеевых почв (в некоторых частях участка формы ареалов почв совпали с контурами серо- и черноольшаников);

6) По значениям TWI и показателя базовых уровней речной сети (Channel network base level), равным 6–16 и 172–184 соответственно, определена конфигурация гидроморфных почв: перегноино-глеевых, торфяных и аллювиальных гумусовых глеевых.

Преобладающими по площади почвами являются те же три ареала, что и на традиционной карте (серогумусовые и серогумусовые постагрогенные — 30% от общей площади участка), перегноино-глеевые (24%), природные и антропогенно-преобразованные альфегумусовые почвы (15%; рис. 2b).

Наиболее точно предсказаны аллювиальные торфяные, агроземы, серогумусовые почвы и серогумусовые постагрогенные (табл. 2). Высокая

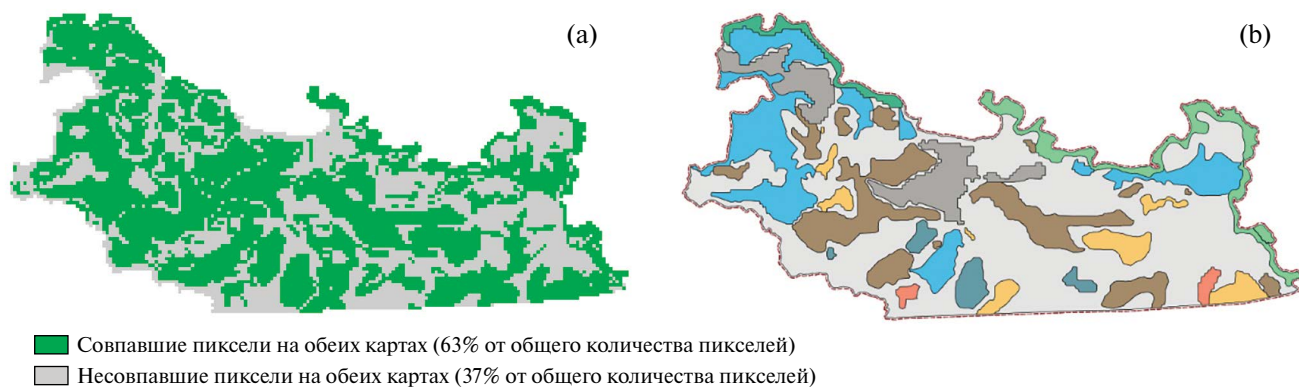
точность предсказания первых двух ареалов связана с их закономерным распространением в пределах ключевого участка и возможностью учета почвенно-ландшафтных связей через точно подобранные предикторы. Аллювиальные торфяные почвы предсказаны по расположению торфяной залежи, агроземы — главным образом по распространению луговой растительности. Высокая точность предсказания серогумусовых и серогумусовых постагрогенных почв обусловлена максимальным количеством точек данного класса в исходной выборке (42 из 148 точек) и приуроченностью этих почв к наиболее возвышенным формам рельефа, что можно учесть благодаря индексу ТРІ и глубине заложения долин.

Высокая продюсерская точность предсказания перегнойно-глеевых почв говорит о малом количестве ошибок при проверке на тестовой выборке. Однако низкая пользовательская точность указывает на отнесение многих пикселей к перегнойно-глеевым почвам. Обратное распределение низкой продюсерской точности с высокой пользовательской отмечено для альфегумусовых почв, аллювиальных серогумусовых глеевых и дерново-подзолистых постагрогенных. Нулевая точность предсказания торфяных почв и торфяно-подзолов свидетельствует о том, что ни один пиксель на карте не был точно отнесен к этим почвам, что связано с недостаточным количеством собранных данных по ним, следовательно, возникает сложность в нахождении корреляции с учитываемыми предикторами. Точность прогноза можно увеличить за счет числа точек опробования и добавления в модель факторов, способствующих выделению ареалов. В случае с торфяными почвами и торфяно-подзолами может быть добавлена информация о видовом составе растительности для выделения заболоченных участков, для дерново-подзолистых — крупномасштабные карты почвообразующих пород.

**Сравнение результатов цифрового и традиционного картографирования.** По конфигурации и приуроченности ареалов к компонентам ландшафта выделенные почвенные ареалы на цифровой карте схожи с одноименными ареалами на экспертной карте. На обеих картах выделено 8 групп почв с близким долевым участием. Общая экспертная точность карт составила 63% (рис. 3а). Преобладающее количество общих пикселей отмечено в западной части участка, с более густой сетью опробования и обладающего довольно четкой пространственной дифференциацией почв, поддающейся учету в цифровой модели. В восточной части больше не совпавших участков, что связано с литологической неоднородностью почвообразующих пород и трудностью разделения природных и антропогенно-преобразованных почв.

Лучше всего совпадают ареалы аллювиальных торфяных почв и агроземов, что объясняется теснотой связи с распространением торфяных залежей и пашен соответственно. Основное различие, касающееся положения агроземов на двух картах, заключается в выделении цифровым методом трех участков в пределах надпойменной террасы р. Василевки. На данный момент эти территории не обрабатываются и находятся под зарастающими лугами на серогумусовых постагрогенных почвах. Согласно используемым материалам из Open street map, в пределах этих участков распространены луга, определяющие положение агроземов в цифровой модели, поэтому эти участки ошибочно отнесены моделью к данной почвенной группе.

Средняя экспертная точность характерна для аллювиальных серогумусовых глеевых и перегнойно-глеевых почв. Эти две группы почв приурочены к характерным формам рельефа под заболоченной растительностью — к речным поймам и локальным понижениям, днищам эрозионных форм. Поэтому



**Рис. 3.** Экспертное сравнение традиционной и цифровой почвенных карт для всего участка (а) и результат наиболее точной пространственной оценки положения отдельных почвенных групп ((b), легенда соответствует обозначениям рис. 2).



на основе NDVI, лесотаксационной карты и морфометрических характеристик рельефа они определены предельно точно относительно одноименных выделов на традиционной карте. Однако на цифровой карте аллювиальные почвы приурочены к поймам водных объектов и протягиваются не только вдоль рек Василевки и Сапшанки, но и озер Сапшо и Петраковское. Хотя по берегам местных водоемов накапливается не аллювий, а перегной, и, соответственно, формируются перегнойные почвы. Поскольку в цифровой модели условия формирования почв на поймах водоемов и водотоков схожи (наиболее низкие в гипсометрическом отношении участки по ТРП с распространением заболоченных ольшаников и ивняков по лесотаксационной карте), и в исходной выборке на речных поймах преобладают аллювиальные гумусовые глеевые почвы, то цифровым методом на поймах озер было предсказано существование таких же почв. Увеличение точек опробования на поймах озер позволило бы улучшить прогноз.

Для торфяных почв экспертная точность ниже. Преимущественно расхождения в отображении почв связаны с участками нижних частей склонов озовых гряд, что обусловлено нехваткой данных полевых наблюдений. Выявить закономерности между включенными в цифровую модель предикторами и результатам прогнозирования затруднительно.

Экспертная точность минимальна для постагрогенных почв в связи со сложностью подбора предиктора, однозначно определяющего условия их формирования. Введение в модель смены луговой растительности лесной, выделяемой на землеустроительных планшетах и современных космических снимках соответственно, не дало значимого эффекта. Для дерново-подзолистых почв одним из важных факторов дифференциации является состав почвообразующих пород, информации о котором в нужном масштабе не найдено.

В итоге анализа результатов картографирования и источников информации о компонентах ландшафта составлена карта (рис. 3б), отражающая положение четырех групп почв (агроземов, аллювиальных торфяных и гумусовых глеевых, перегнойно-глеевых), которые по пользовательской, продюсерской и экспертной оценкам точности формируются именно на этих территориях, и их положение можно верифицировать по имеющимся источникам информации о факторах почвообразования. Для остальных четырех групп ниже вероятность распространения непосредственно в заданных границах и воспроизводимости результатов традиционного и цифрового подходов картографирования, поэтому данные почвы отмечены только непосредственно вблизи мест заложения разрезов.

**Сравнение результатов почвенного картографирования на двух ключевых участках в нацпарке “Смоленское Поозерье”.** Ранее на территории НП проведены аналогичные работы на участке площадью 8,8 км<sup>2</sup> в окрестностях оз. Баклановское со схожим рельефом, растительностью и историей сельскохозяйственного освоения, но более контрастным составом почвообразующих пород. Наибольший вклад при прогнозировании цифровой карты ранее обследованного участка вносил характер субстрата, поскольку его литологический состав неоднородный и представлен суглинистыми, супесчаными, песчаными породами и органогенными торфяными отложениями. Однако для предсказания некоторых почв его исключение из цифровой модели не снижало точность. Общая точность прогноза цифровых карт и общая экспертная точность на двух картографируемых участках идентичны. В целом пространственное положение выделенных почвенных ареалов на цифровых картах сходно с таковым на традиционных картах, что свидетельствует о возможности подходов ЦПК хорошо предсказывать почвенно-ландшафтные связи даже в таком сложном регионе, как Смоленское Поозерье [34].

Рассмотрим примеры с почвами, выделенными на обоих участках для сравнения результатов картографирования цифровым методом. В статье [14] дерново-подзолистые и торфяные почвы отчетливо выделяются на традиционной карте и точно предсказываются (82–87 и 50% соответственно) тем же методом случайных лесов. При исключении из модели данных о гранулометрическом составе пород точность предсказания дерново-подзолистых почв сохранилась, а торфяных почв снизилась до 0. Следовательно, основным фактором предсказания расположения торфяных почв служит именно информация о распространении торфяных образований. Отсутствие этих данных не позволило выделить торфяные почвы на ранее обследованном участке. В данной работе знание границ торфяного месторождения “Слободское” дало возможность надежно идентифицировать аллювиальные торфяные почвы. Поскольку точек с дерново-подзолистыми почвами в предшествующем исследовании было больше, чем в настоящем (15 против 6), то, скорее всего, алгоритм выявил иные, более значимые предикторы.

Тем не менее информация о составе почвообразующих пород важна. Так, точность предсказания перегнойно-глеевых почв выше в данном исследовании (продюсерская возросла от 28 до 87%) за счет двукратно большего числа точек в исходной выборке и добавления в виде предиктора информации о распространении серо- и черноольшаников. Еще можно отметить повышение точности идентификации серогумусовых почв и агроземов за счет увеличения размера выборки.

Стоит выделить несколько важных моментов, являющихся дискуссионными и вносящими неточности при картографировании почвенного покрова рассматриваемой территории:

- отсутствие надежной информации о гранулометрическом составе почвообразующих пород в крупном масштабе и даже в более мелком снижает точность разделения подзолов и дерново-подзолистых почв;

- использование лесотаксационной карты масштаба 1 : 100 000 могло способствовать недоучету фактора растительности в дифференциацию почвенного покрова и невозможности разделения ареалов подтипов текстурно-дифференцированных почв, что удалось сделать в отношении аллювиальных почв, используя информацию об NDVI;

- главным источником, определяющим расположение и распространение аллювиальных торфяных почв, служил паспорт торфяного месторождения, оконтуренного по мощности торфяной толщи более 50 см, что может занижать реальную площадь, занимаемую этими почвами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Территория национального парка “Смоленское Поозерье” отличается разнообразием рельефа и почвообразующих пород, длительной историей освоения земель и их поэтапного выведения из сельскохозяйственного оборота. Все эти факторы значимо повлияли на дифференциацию почв. Основные компоненты, определяющие пространственное распределение почвенных ареалов в экспертной и цифровой почвенно-ландшафтных моделях, — топографический индекс влажности и лесотаксационная карта.

На традиционной и цифровой карте выделено 8 групп почвенных ареалов, имеющих схожее положение и конфигурацию. Близко долевое участие одних и тех же почв (наибольшие площади заняты серогумусовыми и серогумусовыми постагрогенными почвами, перегнойно-глеевыми и альфегумусовыми; наименьшие — аллювиальными торфяными и дерново-подзолистыми постагрогенными). Общая точность прогноза на цифровой карте составила 57%, общая экспертная точность — 63%. Качество прогноза зависело от состава учитываемых предикторов, их точности, масштаба, а также от количества описаний каждой выделенной группы почв. В западной части картографируемой области экспертная точность выше относительно восточной части за счет того, что ведущим фактором дифференциации почвенного покрова там является рельеф, характеристики которого легче учесть в цифровой модели, а также за счет большего числа точек наблюдений. Наиболее точно предсказано положение агроземов, аллювиальных

торфяных и перегнойно-глеевых почв, хуже всего — ареалов с постагрогенными почвами.

Сравнительный анализ результатов крупномасштабного картографирования почвенного покрова в разных частях национального парка выявил важность учета информации о составе почвообразующих пород, поскольку территория “Смоленского Поозерья” неоднородна по своему литологическому строению. При отсутствии данной информации необходимо использовать иные дополнительные материалы (информацию о гранулометрическом составе почв с крупномасштабных почвенных карт, видовом составе растительности, истории землепользования за разные временные интервалы), позволяющие идентифицировать почву и очертить границы ее распространения. Таким образом, точность предсказания цифрового метода может возрасти.

Цифровой метод представляется перспективным для использования в создании крупномасштабных почвенных карт.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарны за предоставление оцифрованных снимков CORONA, паспорта торфяного месторождения “Слободское”, лесотаксационной и топографической карт на рассматриваемую территорию И.М. Бавшину и почвенных карт колхозов и совхозов — О.В. Шопиной и участникам полевых работ — А.Д. Наумову, Д.А. Тереховой и П.Д. Чеченкову.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 21-74-20171.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X25020016>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимова М.И. Мелкомасштабное почвенное картографирование. М., 2010. 97 с.
2. Герасимова М.И., Богданова М.Д. Картография почв на страницах журнала “Почвоведение” (обзор публикаций с 1899 г.) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. № 107. С. 139–179.

3. *Гонн Н.В., Мешалкина Ю.Л., Нарыкова А.Н., Плотникова А.С., Чернова О.В.* Картографирование содержания и запасов органического углерода почв на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов // *Вопросы лесной науки.* 2023. Т. 6. № 1. С. 14–73. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>
4. *Докучаев В.В.* Картография русских почв. СПб.: Изд-во М-ва гос. имуществ, 1879. 114 с.
5. *Долгова Л.С.* Методика составления мелкомасштабных почвенных карт. М.: Изд-во Московского университета, 1980. 80 с.
6. Карта-схема, окрашенная по породам. Лесоустройство, 2013, 2014. Смоленск: ФГБУ Национальный парк “Смоленское Поозерье” Смоленской области, 2015.
7. *Епринцев С.А., Клепиков О.В., Шекоян С.В.* Дистанционное зондирование Земли как способ оценки качества окружающей среды урбанизированных территорий // *Здоровье населения и среда обитания.* 2020. № 4(325). С. 5–12. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-325-4-5-12>
8. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
9. *Козлов Д.Н., Сорокина Н.П.* Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии // *Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования.* М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. С. 35–57.
10. Комплексное изучение состояния природы Смоленского Поозерья в целях охраны и рационального использования на момент организации в этом регионе национального природного парка / Под ред. Круглова Н.Д. Смоленск: Смоленский гос. пед. ин-т, 1995. 513 с.
11. *Королева Н.В., Тихонова Е.В., Ершов Д.В., Салтыков А.Н., Гаврилюк Е.А., Пугачевский А.В.* Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке “Смоленское Поозерье” за 25 лет по спутниковым данным Landsat // *Лесоведение.* 2018. № 2. С. 83–96.
12. *Костюкевич А.В.* Почвенный покров Смоленской губернии. Смоленск, 1925. 26 с.
13. *Красильников П.В., Сидорова В.А., Дубровина И.А.* Использование крупномасштабных почвенных карт и ключевых участков для создания почвенно-географических моделей в Карелии // *Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования.* М., 2012. С. 220–235.
14. *Куликова А.И., Чеченков П.Д., Осипова М.С., Шопина О.В., Семенков И.Н.* Сравнительный анализ результатов традиционного и цифрового крупномасштабного почвенного картографирования на примере участка в национальном парке “Смоленское Поозерье” // *Почвоведение.* 2023. № 3. С. 312–320. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600986>
15. *Кучинский П.А.* Почвы Смоленской области и способы повышения их плодородия / Под ред. Погуляева Д.И. Смол. обл. краевед. науч.-исслед. ин-т. Смоленск, 1950. 318 с.
16. *Маймусов Д.Ф.* Почвы Смоленской области (генезис, состояние, управление плодородием). М.: Прометей. 1992. 286 с.
17. *Маймусов Д.Ф.* Почвы Смоленской области, их улучшение и использование. Смоленск: кн. изд-во. 1963. 274 с.
18. Общесоюзная инструкция по крупномасштабным почвенным и агрохимическим исследованиям территории колхозов и совхозов и по составлению почвенных карт территорий колхозно-совхозных управлений. М.: Колос, 1964. 109 с.
19. *Погуляев Д. И., Шостына А. А.* Природа и физико-географические (природные) районы Смоленской области. Смоленск: Смоленское книжное изд-во, 1963. 128 с.
20. Полевой определитель почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
21. Почвенная карта РСФСР (под ред. В.М. Фридланда). М-б 1:2 500 000. М.: ГУГК, 1988 г.
22. Почвенная карта Смоленской области. М-б 1 500 000. Авторы: нет данных. М.: Главное управление геодезии и картографии государственного геологического комитета СССР, Атлас Смоленской области, 1964.
23. Почвенные карты совхозов Демидовского и Духовщинского районов Смоленской области. М-б 1 : 10 000. Смоленск: ВНИИГиМ и института “Центргипрозем”, 1985–1992.
24. Почвенная карта Демидовского района Смоленской области. М-б 1 : 50 000. Смоленск: Смоленский филиал института “Центргипрозем”, 1992.
25. Растительность и почвы национального парка “Смоленское Поозерье” / Под ред. Копчик Г.Н., Березиной Н.А. М: НИА-Природа, 2003. 307 с.
26. *Розанов Б.Г.* Роль почвообразующих пород в географии и плодородии почв западной части Смоленской области // *Почвы дерново-подзолистой зоны и их рациональное использование (на примере Смоленской области)* / Под ред. Евдокимовой Т.И., Розанова Б.Г. М., 1969. С. 13–23.
27. *Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю.* Современные тренды и проблемы почвенной картографии // *Почвоведение.* 2019. № 5. С. 517–528. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19050101>
28. *Савин И.Ю., Столбовой В.С., Иванов А.Л., Прудникова Е.Ю. Жоголев А.В., Воронин А.Я.* Технологии составления и обновления почвенных карт. М.: Перо, 2019. 328 с.
29. *Сорокина Н.П.* Региональная модель почвенно-ландшафтных связей (на примере Клиньско-Дмитровской гряды) // *Почвоведение.* 1998. № 4. С. 389–398.

30. Сорокина Н.П., Козлов Д.Н. Опыт цифрового картографирования структуры почвенного покрова // Почвоведение. 2009. № 2. С. 198–210.
31. Терехова Д.А., Смирнова М.А., Гераськина А.П., Шопина О.В., Кузнецова А.И., Бавшин И.М., Клиник Г.В., Енчилик П.Р., Хохряков В.Р., Герасимова М.И., Семенков И.Н. Макрофауна и органическое вещество в постагрогенных песчаных и супесчаных почвах северо-запада Смоленской области (Россия) // Почвоведение. 2023. № 8. С. 981–996. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600105>
32. Чистяков С. П. Случайные леса: обзор // Тр. Карельского научного центра. 2013. № 1. С. 117–136.
33. Фетисов Д.М., Жучков Д.В., Горюхин М.В. Оценка уровня озеленения города Биробиджана с применением мультиспектральных данных // Биосфера. 2021. Т. 13. № 4. С. 170–179.
34. Шопина О.В., Герасимова М.И., Бавшин И.М., Хохряков В.Р., Семенков И.Н. Инвентаризация и картографирование почв национального парка “Смоленское Поозерье” // Лесоведение. 2022. № 5. С. 478–493. <https://doi.org/10.31857/S0024114822040088>
35. Шопина О.В., Гераськина А.П., Кузнецова А.И., Тихонова Е.В., Титовец А.В., Бавшин И.М., Хохряков В.Р., Семенков И.Н. Стадии постагрогенного восстановления компонентов экосистем сосновых лесов национального парка “Смоленское Поозерье” // Почвоведение. 2023. № 1. С. 10–24. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600706>
36. Adeniyi O.D., Bature H., Mearker M. A. Systematic review on digital soil mapping approaches in lowland areas // Land. 2024. V. 13. P. 379. <https://doi.org/10.3390/land13030379>
37. Bhandari A.K., Kumar A., Singh G.K. Feature extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A case study of Jabalpur city // Procedia technology. 2012. V. 6. P. 612–621. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.10.074>
38. Breiman L. Bagging predictors // Machine learning. 1996. V. 24. № 2. P. 123–140. <https://doi.org/10.1023/A:1018054314350>
39. Breiman L. Random forests // Machine learning. 2001. V. 45. № 1. P. 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
40. Cahyana D., Barus B., Darmawan, Mulyanto B., Sulaeman Y., Huang J. Using a fuzzy logic approach to reveal soil-landscape relationships produced by digital soil maps in the humid tropical region of East Java, Indonesia // Geoderma Regional. 2022. V. 28. P. e00468. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00468>
41. Cahyana D., Sulaeman Y., Barus B., Darmawan, Mulyanto B. Improving digital soil mapping in Bogor, Indonesia using parent material information // Geoderma Regional. 2023. V. 33. P. e00627. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00627>
42. Hashim H., Abd Latif Z., Adnan N.A. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery // Int. Archives Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sci. 2019. V. 42. P. 237–240. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-237-2019>
43. Hengl T., MacMillan R.A. Predictive soil mapping with R. Wageningen: OpenGeoHub foundation, 2019. 370 p.
44. Hudson B.D. The soil survey as paradigm-based science // Soil Sci. Soc. Am. J. 1992. V. 56. P. 836–841. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030027x>
45. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4<sup>th</sup> edition. International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, 2022. 234 p.
46. Khaledian Y., Miller B. A. Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping // Appl. Mathema. Model. 2020. V. 81. P. 401–418. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.12.016>
47. Lagacherie P., McBratney A. B. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping // Developments Soil Sci. 2006. V. 31. P. 3–22. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(06\)31001-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31001-X)
48. Legros J.P. Mapping of the Soil. Enfield, New Hampshire: Science Publishers, 2006. 411 p.
49. Manteghi S., Maravej K., Mousavi S. R., Delavar M. A., Mastinu A. Digital soil mapping for soil types using machine learning approaches at the landscape scale in the arid regions of Iran // Adv. Space Res. 2024. V. 74. № 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.04.042>
50. McBratney A. B., Mendonça Santos M. L., Minasny B. On digital soil mapping // Geoderma. 2003. № 117(1–2). P. 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
51. Minasny B., McBratney A. B. Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. V. 264. P. 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>
52. Nabiollahi K., Taghizadeh-Mehrjardi R., Shahabi A., Heung B., Amirian-Chakan A., Davari D., Scholten T. Assessing agricultural salt-affected land using digital soil mapping and hybridized random forests // Geoderma. 2021. V. 385. P. 114858. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114858>
53. Padarian J., Minasny B., McBratney A.B. Machine learning and soil sciences: A review aided by machine learning tools // Soil. 2020. V. 6. № 1. P. 35–52. <https://doi.org/10.5194/soil-6-35-2020>
54. Rossiter D.G. Assessing the thematic accuracy of area-class soil maps // Soil Science Division, ITC. Enschede, Holland. Waiting publication. 2001.
55. Suleymanov A., Arrouays D., Savin I. Digital soil mapping in the Russian Federation: a review // Geoderma Regional. 2024. V. 36. P. e00763. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00763>

56. Wadoux A.M.J.-C., Padarian J., Minasny B. Multi-source data integration for soil mapping using deep learning // *Soil*. 2019. V. 5. № 1. P. 107–119. <https://doi.org/10.5194/soil-5-107-2019>
57. Wadoux A.M.J.C., Minasny B., McBratney A.B. Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions // *Earth-Sci. Rev.* 2020. V. 210. P. 103359. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>
58. Yang L., Jiao Y., Fahmy S., Zhu A.-X., Hann S., Burt J.E., Qi F. Updating conventional soil maps through digital soil mapping // *Soil Sci. Soc. Am.* 2011. J. 75. P. 1044–1053. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0002>
59. Zeraatpisheh M., Ayoubi S., Jafari A., Finke P. Comparing the efficiency of digital and conventional soil mapping to predict soil types in a semi-arid region in Iran // *Geomorphology*. 2017. V. 285. P. 186–204.

## Conventional and Digital Soil Mapping in the Central Part of the Smolenskoe Poozerye National Park

A. I. Kornilova<sup>a, b, \*</sup>, M. A. Smirnova<sup>b</sup>, and I. N. Semenov<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>*Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

<sup>b</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: kulikovanastya2001@yandex.ru*

For an area of 8.6 km<sup>2</sup> in the central part of the Smolenskoye Poozerye National Park, soil maps (1 : 25 000) were made using conventional and digital mapping (DSM) methods based on relief, vegetation, time and antropogenic factors of soil formation with subsequent comparative analysis of the results. Both maps show that the study area is dominated by gray humus soils (Umbric Cambisols (Arenic, Aric)), which are related to agricultural land-use in the past and self-restoration of abandoned plowed soils. Smaller territories are occupied by alluvial peat (Histic Fluvisols) and postagrogenic texture-differentiated soils (Albic Glossic Retisols (Aric, Loamic)). The overall accuracy of the map made by the DSM method was 57%. The Topographical Wetness Index (TWI) and the forest taxation map were leading soil-forming factors, represented in both expert and digital models. The distribution of alluvial peat (Histic Fluvisols) and agrozems (Arenosols (Aric)) is best predicted by DSM method (with an accuracy of 100 and 86%, respectively) and associated with peat deposits and modern arable lands. The location of peat soils (Fibric Histosols) and peat-podzols (Histic Albic Podzols (Arenic)) is predicted with the least accuracy (0%). The accuracy of predicting the location of Al-Fe humus (Podzols), texture-differentiated (Retisols), organo-accumulative (Umbric Cambisols), gley (Histic Gleysols), and alluvial humus gley soils (Gleyic Fluvisols) varied within 50–63%. The DSM method reproduced the result of conventional mapping by 63%.

**Keywords:** soils area, boreal ecosystems, geographic information systems, compare-geographic method, machine learning, random forests, predictors