

УДК 631.445.12, 528.94

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-6-41



Ссылки для цитирования:

Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Чуванов С.В., Жоголев А.В. Цифровое почвенное картографирование заболоченной равнины юга криолитозоны Западной Сибири на основе мультиспектральной спутниковой съемки и наземных исследований // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 6-41. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-6-41

Cite this article as:

Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Chuvanov S.V., Zhogolev A.V., Digital soil mapping of the boggy plain in the south of the cryolithozone of West Siberia based on multispectral satellite imagery and on-ground soil studies, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 6-41, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-6-41

Благодарность:

Авторы выражают признательность академику И.Ю. Савину за помощь в подготовке материалов к статье и просмотр рукописи, Дирекции природного парка “Нумто” в лице директора Л.А. Матвеевой и научного сотрудника Е.Л. Веревкиной за поддержку в работе и предоставленные материалы. Исследование выполнено в рамках государственных заданий Почвенного института имени В.В. Докучаева и МГУ имени М.В. Ломоносова.

Acknowledgments:

The authors express their gratitude to Academician I.Yu. Savin for assistance in preparing the materials for this article and reviewing the manuscript. The Administration of Numto Nature Park, represented by Director L.A. Matveeva and researcher E.L. Verevkin, are grateful for their support and the materials they provided. This study was conducted within the framework of state assignments of Lomonosov Moscow State University and Dokuchaev Soil Science Institute.

Цифровое почвенное картографирование заболоченной равнины юга криолитозоны Западной Сибири на основе мультиспектральной спутниковой съемки и наземных исследований

© 2025 г. Е. А. Шишконокова^{1*}, Н. А. Аветов²,
С. В. Чуванов^{1,2**}, А. В. Жоголев^{1***}

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

*e-mail: shishkonakova_ea@esoil.ru,
**<https://orcid.org/0000-0003-0458-2602>,
***<https://orcid.org/0000-0003-2225-7037>.

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

Поступила в редакцию 24.10.2024, после доработки 08.11.2024,
принята к публикации 16.09.2025

Резюме: Детальные почвенные карты заболоченных равнин севера Западно-Сибирской низменности до сих пор отсутствуют, несмотря на растущее внимание к этому региону со стороны экологов в связи с потеплением климата и его экстенсивным освоением нефтегазодобывающим комплексом. Территория природного парка “Нумто” была выбрана в качестве полигона для исследования возможности почвенного картографирования заболоченных равнин как весьма характерная по набору представленных ландшафтов, свойственных северо-таежной и лесотундровой зонам Западной Сибири, включающему как бореальные, так и мерзлые болотные системы. При составлении почвенной среднемасштабной карты были использованы традиционные методы почвенной съемки и геоботанической индикации почв, а также методы цифрового картографирования почв, основанные на применении машинного обучения. В качестве основы картографирования были выбраны два спутниковых многозональных снимка Landsat-8 с размером пикселя 30 м на местности от 8 сентября 2023 г. Информативность почвенной карты была повышена за счет включения в состав легенды торфяных мезотрофных почв, а также почв влажных регрессивных болот и хасырейных ландшафтов. Для верификации составленной карты было осуществлено: 1) ее сопоставление с 30 детальными почвенными картами микроключей бассейна Казыма; 2) оценка точности с использованием случайных стратифицированных точек (stratified random points); 3) точечное повторное наземное обследование. Точность карты по разным оценкам составила от 75.0% до 78.4%. Наибольшую сложность вызывает картографирование почв мелкоконтурных плоскобугристых торфяников, чередующихся с талыми комплексными болотами с доминированием лишайников на повышенных элементах болотного рельефа. Доминирующим компонентом почвенного покрова на территории парка

выступают талые олиготрофные торфяные почвы (доля в составе почвенного покрова 43.5%). Сочетания олиготрофных торфяных почв плоскобугристых и крупнобугристых комплексов занимают 11.3%; подзолы – 13.3%; комплексы олиготрофных торфяных (в том числе влажных регрессивных) и мезотрофных торфяных почв – 8.3%; мезотрофные почвы – 7.1%.

Ключевые слова: почвенные карты; почвы болот; верификация карт; состав почвенного покрова; природный парк “Нумто”.

Digital soil mapping of the boggy plain in the south of the cryolithozone of West Siberia based on multispectral satellite imagery and on-ground soil studies

© 2025 E. A. Shishkonakova^{1*}, N. A. Avetov², S. V. Chuvanov^{1,2**},
A. V. Zhogolev^{1***}

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

* e-mail: shishkonakova_ea@esoil.ru,

** <https://orcid.org/0000-0003-0458-2602>,

*** <https://orcid.org/0000-0003-2225-7037>.

²Lomonosov Moscow State University,

1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.

Received 24.10.2024, Revised 08.11.2024, Accepted 16.09.2025

Abstract: Soil mapping of the boggy plains of the north of the West Siberian Lowland still remains poorly developed, despite the growing attention to this region from environmentalists due to global warming and its extensive development by the oil and gas producing complex. The territory of the Numto Nature Park was chosen as a testing ground for studying the possibility of soil mapping of boggy plains as it is very typical in terms of the set of presented landscapes inherent in the northern taiga and forest-tundra zones of Western Siberia, including both boreal and frozen bog systems. When compiling the medium-scale soil map, traditional methods of soil survey and geobotanical indication of soils, as well as digital cartography methods based on machine learning were used. Two Landsat-8 multispectral satellite images with a pixel size of 30 meters on the ground from September 8, 2023, were selected as the basis for mapping. The information content of the soil map was increased by including peat mesotrophic soils, as well as soils of wet

regressive bogs and khasyrei landscapes (dry lake beds) in the legend. To verify the compiled map the following were performed: 1) its comparison with 30 detailed soil maps of the Kazym basin microkeys; 2) accuracy assessment in the SCP plugin with creation of stratified random points; 3) point repeat ground survey. The accuracy of the map, according to various estimates, ranged from 75.0% to 78.4%. The greatest difficulty is in mapping the soils of small-flat-mound peatlands alternating with thawed complex bogs with dominance of lichens on elevated elements of the bogs. The dominant component of the soil cover in the park is thawed oligotrophic peat soils (share in the soil cover composition is 43.5%). Combinations of oligotrophic peat soils of palsa complexes occupy 11.3%, podzols – 13.3%; complexes of oligotrophic peat (including wet regressive) and mesotrophic peat soils – 8.3%, mesotrophic soils – 7.1%.

Keywords: soil maps; bog soils; map verification; soil cover composition; Numto Nature Park.

ВВЕДЕНИЕ

Картографирование почв в Западной Сибири на протяжении всей своей истории было неразрывно связано с характером землепользования, практиковавшимся в различных ее частях и, в частности, со степенью их сельскохозяйственной освоенности. В то время как степные, лесостепные и отчасти южнотаежные регионы Западно-Сибирской низменности в течение XX в. (начиная с деятельности Переселенческого управления министерства земледелия Российской Империи) оказались охвачены масштабными почвенно-географическими изысканиями, необходимыми для интенсификации сельскохозяйственного производства, северные территории таежной зоны до конца 1950-х годов практически выпали из сферы внимания почвоведов. Начавшиеся в 1960-х годах почвенные исследования в неосвоенных бореальных районах Западной Сибири ограничивались разрозненными маршрутными наблюдениями, часто затрудняемыми отсутствием транспортной доступности территории. Опубликованные по их результатам работы показали, что наибольшую сложность представляет собой генетическая интерпретация крайне слабого проявления подзолистого процесса на суглинисто-глинистых породах или полного его отсутствия (Долгова, Гаврилова, 1971; Караваева, 1973; Ковалев и др., 1974; Уфимцева, 1974; Гаджиев, Овчинников, 1977; Фирсова,

1977; Добровольский и др., 1981). С другой стороны, несмотря на высокую заболоченность центра Западно-Сибирской низменности, проблемы диагностики, систематики и географии торфяных болотных почв не получили широкого обсуждения. Среди затронутых авторами аспектов болотного почвоведения следует обратить внимание на предложение Н.А. Караваевой (1973) разделять растущие и минерализованные торфяники; указания К.А. Уфимцевой (1974) на целесообразность при почвенно-картографических работах на заболоченных территориях сопоставлять и совмещать картографические материалы, полученные болотоведами, геоботаниками и специалистами торфоразведки; а также представления В.П. Фирсовой (1977) о преобладании болотных переходных почв над низинными при повсеместном распространении болотных верховых почв в северном Зауралье. Картографирование почв в регионе активизировалось значительно позже, уже на рубеже XX и XXI вв., преимущественно в нефтедобывающих районах ХМАО-Югры и ЯНАО (Терещенков и др., 1991; Аветов, Трофимов, 1997; Смоленцев, 2002; Грибов и др., 2004; Коркина и др., 2016; Аветов и др., 2017; Шишконокова и др., 2020). Несомненно, большое значение для познания почвенно-географических закономерностей в бореальной зоне России (на примере ее европейской части) имела и монография С.В. Горячкина “Почвенный покров Севера” (2010). В дальнейшем применение обновленного варианта классификации торфяных почв позволило разработать подробную легенду к серии детальных почвенных карт (микрочлукчей) заболоченной равнины бассейна Казыма (Аветов и др., 2022). Из 33 представленных в легенде единиц картографирования 30 обозначали торфяные почвы. Это, в частности, позволило в определенной мере преодолеть традиционно существующие взгляды на почвенный покров крупных водоразделов с торфяными почвами как относительно просто организованный (Фридланд, 1984).

Следует подчеркнуть, что востребованность почвенно-картографических материалов на севере таежной зоны Западной Сибири в настоящее время особенно возрастает в связи, с одной стороны, с экстенсивным освоением нефтегазодобывающим комплексом все новых территорий и, с другой стороны, с резко увеличивающимся общественным и научным интересом к роли бо-

лотных и таежных экосистем в балансе углерода на фоне прогрессирующего потепления климата региона.

Цель настоящей статьи – выявить возможности цифровой почвенной картографии, основанной на материалах мультиспектральной спутниковой съемки и выборочных наземных почвенных исследованиях, в отображении пространственного распределения почв и почвенных комбинаций бореальной заболоченной равнины на примере природного парка “Нумто” и сопредельных территорий. Апробированная методика позволит в дальнейшем применить ее к картографированию почв заболоченных равнин – ландшафта, имеющего широкое распространение на севере Западной Сибири.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом данного исследования послужила территория природного парка “Нумто”, под которой в данной работе понимается собственно территория парка с некоторыми прилегающими к нему местностями, в разное время входившими в его границы. Согласно Федеральному закону от 21.04.2025 № 97-ФЗ “О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации” территория парка “Нумто”, как и весь Белоярский район ХМАО-Югры, входит в Арктическую зону РФ.

Природный парк “Нумто” расположен на севере Ханты-Мансийского округа – Югры, в подзоне северной тайги, и простирается от северного макросклона Сибирских увалов на юге до Полуйской возвышенности на севере, захватывая их части. Центральная часть парка представляет собой заболоченную равнину. В соответствии с почвенно-экологическим районированием России его территория относится к Нижнеобской провинции болотных почв и таежных глееземов северо-таежной подзоны Европейско-Западно-Сибирской таежно-лесной почвенно-биоклиматической области (Добровольский, Урусевская, 2004). Структура почвенного покрова парка во многом определяется его высокой заболоченностью, наличием мерзлотных почв, большим количеством озер разного размера и происхождения. Кроме того, весьма разнообразный генезис почвообразующих пород территории парка “Нумто” обусловлен сложной геологической историей, включаю-

шей морские трансгрессии, оледенения, аллювиально-озерную и водно-ледниковую деятельность, торфонакопление, проявления криогенеза. Как и на большей части пространства Западно-Сибирской низменности, амплитуда вертикального расчленения крайне невелика и не превышает 70 м (уклоны составляют менее 1.0 м на 1 км) (Валеева и др., 2008). Территория парка отличается относительно развитой гидрологической сетью, включающей бассейны реки Казым с его притоками Курьёх, Соромказым, Сюньюган, Ай-Курьёх, Хорьёхан и др., и истоки реки Надым с его притоками Хеттой и Ай-Надымом. Также для парка характерно большое количество озер, особенно на его востоке и северо-востоке, прежде всего в районе, прилегающем к озеру Нумто.

Расположение парка “Нумто” на границе соприкосновения талых и мерзлых болотных ландшафтов на Западно-Сибирской равнине определяет уникальность его природы. Одной из особенностей является присутствие на территории парка ландшафтов тундрового типа, во многом сходных с ерниково-кустарничково-лишайниковыми тундрами, характерными для более северных районов, в том числе для полуостровов Тазовский и Ямал (Московченко, Козин, 2017).

Таким образом, выраженный равнинный рельеф и преобладание водно-болотных ландшафтов, отличающихся высоким разнообразием, включающим, в том числе, мерзлые, преимущественно плоскобугристые болота, позволяют использовать территорию парка “Нумто” как потенциальный полигон для исследования возможности картографирования заболоченных равнин севера Западной Сибири.

В основе традиционных (наземных) методов построения карты лежат как приемы собственно почвенной съемки (Евдокимова, 1987), так и ландшафтно-индикационные связи, позволяющие во многих случаях использовать дешифровочные признаки растительности на космических снимках для достоверного распознавания почвенных выделов. Особенностью торфяных почв, как известно, является их всецелая обусловленность растительным покровом болот, определяемая тем обстоятельством, что, как правило, современная растительность соответствует по ботаническому составу основной массе торфа в пределах почвенного профиля.

В частности, устойчивые индикационные связи обнаруживаются между трофностью растительности и типовой принадлежностью почв по способам минерального питания (олиготрофные, мезотрофные, эвтрофные почвы). Учитывая, что различные таксономические единицы почв отличаются определенной приуроченностью к условиям увлажнения, а геоботаническая индикация при этом позволяет выявить этот фактор на его значительном градиенте и по широкому спектру видов растений, растительность и в этом отношении выступает в качестве значимого индикатора состава почвенного покрова.

Традиционные методы картографирования в настоящей работе сочетались с методами цифровой почвенной картографии, основанными на использовании машинного обучения (Heung et al., 2016; Wadoux et al., 2020). Для моделирования и верификации моделей было заложено 211 точек, обеспеченных разрезами (колонками торфяных почв) и геоботаническими описаниями, сосредоточенных в южной части парка (табл. 1). Северная его половина в связи с транспортной недоступностью не была охвачена наземными исследованиями. Каждая точка включала описание почвенного профиля и геоботаническое описание. Расположение и подбор точек отражали ландшафтное разнообразие района исследования.

Основой анализа послужили два спутниковых многозональных снимка Landsat-8 с размером пикселя 30 м на местности от 8 сентября 2023 г. Оба снимка были сделаны в одно и то же время и датированы одним и тем же днем, что позволило их объединить в пределах границ парка “Нумто”. Такие снимки широко используются для создания и актуализации почвенных цифровых карт бореальных и арктических районов (Каверин и др., 2012; Векшина; 2019, Ахметова, Токарев, 2020). Дополнительным источником информации послужила карта растительности парка “Нумто” масштаба 1 : 100 000 под редакцией Д.В. Московченко 2023 г., представленная дирекцией парка.

Цифровая почвенная карта создавалась в программе QGIS 3.34 с применением плагина Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) в прямоугольной системе координат UTM для зоны 42N северного полушария на основе геодезической системы WGS 84 (EPSG:32642). Обучающая выборка состояла как из точек, охва-

ченных полевыми описаниями, так и из точек, которые были визуально экспертно отдешифрированы по изображению. Всего выборка составила 334 группы пикселей (зон интереса, Region of Interest, ROI), представляющих 12 классов (единиц картографирования) легенды. Для построения карты использовалась классификация с обучением (supervised classification) по всем каналам снимка (с 1 по 6) с использованием подхода случайных деревьев (Random Forest) для распределения пикселей по классам (van der Westhuizen et al., 2023). Количество деревьев составляло 100 (Belgiu, 2016), большее число деревьев для данной карты не приводило к существенному улучшению точности, но значительно замедляло ее построение, остальные настройки были заданы по умолчанию.

Согры рек (эвтрофные и мезо-эвтрофные древесные пойменные болота), пойма реки Казым дешифрировались визуальную вручную и были наложены на цифровую карту. Такой прием использовался в связи с тем, что растительный покров согр не отличался по спектральным характеристикам от растительности, развивающейся на глееземах. На эту проблему при идентификации лесных мезо- и эвтрофных болот обращают внимание и И.Е. Терентьева с соавторами (2020), отмечая, что их спектральные характеристики практически идентичны с лесными массивами, при том что использование вегетационных индексов в этом случае также не дает хороших результатов, поскольку значения индекса сходны для обоих типов объектов.

Аналогичным образом вручную были установлены границы почвенных контуров визуальную хорошо различимых ландшафтов хасырейного типа, приуроченных к озерным котловинам. Представленные в хасырях почвенные комбинации включают компоненты инициального болотного почвообразования на свежих озерных отложениях, более не встречающиеся в других ландшафтах парка.

Для верификации построенной карты были использованы три метода:

1) *Оценка точности в плагине SCP с созданием случайных стратифицированных точек (stratified random points)* производилась на снимках более высокого разрешения, чем Landsat (были использованы космические снимки Google, Bing, Yandex, предла-

гаемые программой SAS.Planet), для всей картографируемой территории. Для оценки точности выборка составила 398 пикселей, распределенных по 12 классам легенды в соответствии с их весом. Подробное описание этой методики и используемые формулы приводятся в статье Р. Olofsson с соавторами (2014). После экспертной интерпретации всех этих пикселей полученный векторный слой накладывался на цифровую карту парка “Нумто”, и плагин подсчитывал статистические характеристики изображения: точность производителя, точность пользователя, площади, стандартные ошибки, доверительный интервал для каждого класса легенды, а также общую точность для всей карты.

2) *Оценка точности цифровой почвенной карты проводилась с использованием детальных почвенных карт* масштаба 1 : 5 000, построенных традиционными методами при полевых обследованиях, для 30 ключевых участков, в основном покрывающих разнообразие почв южной части парка (за исключением почв хасыреев и поймы Казыма) (рис. 1). Детальные карты были генерализованы до пространственного разрешения 30 м. По ним была построена независимая проверочная выборка.

3) *Оценка точности построенной карты с использованием полевой верификации* проводилась на основе 45 точек (рис. 1), заложенных случайным образом в разных ландшафтах южной части парка “Нумто” в августе 2024 г. Для каждого ключевого участка описывался ландшафт, характерные для него почвы и растительный покров. Затем полученные точки были наложены на цифровую почвенную карту.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По своему содержанию легенда к почвенной карте природного парка “Нумто” составлялась в соответствии с подходами, применяемыми при среднемасштабной почвенной съемке. В качестве основы легенды нами была выбрана легенда к почвенной карте микроключей (Аветов и др., 2022), однако, учитывая гораздо меньший масштаб создаваемой карты, было проведено укрупнение единиц картографирования, выразившееся в исключении видов и подвидов торфяных почв по ботаническому составу и степени разложения торфа из содержания легенды и в объединении ви-

дов по мощности торфяной залежи с указанием преобладающих таксонов (например, торфяные преимущественно среднемощные и мощные).

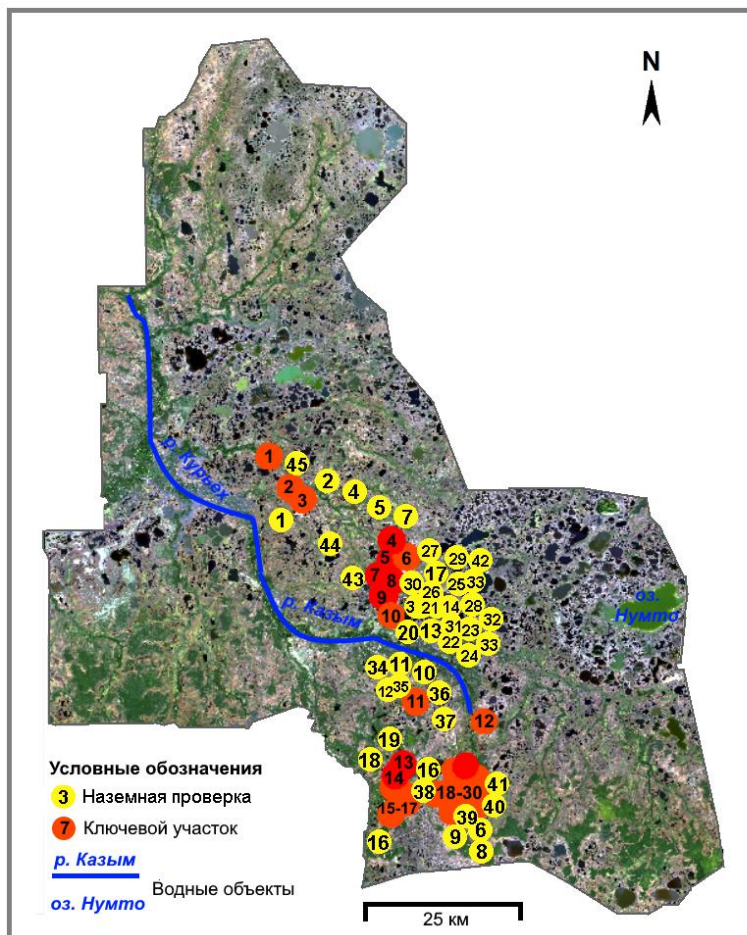


Рис. 1. Размещение ключевых участков детальных почвенных карт и точек полевой верификации (наземной проверки).

Fig. 1. Placement of key areas of detailed soil maps and field verification points (on-ground checks).

В легенде отображены наиболее распространенные таксоны органогенных почв на типовом и подтиповом уровнях, в том числе предложенные нами ранее подтипы влажных регрессивных и сухих регрессивных почв в рамках типа торфяных олиготрофных почв (Шишконокова и др., 2016; Аветов и др., 2022) (табл. 1). Учитывая комплексность болот, большинство единиц картографирования торфяных почв представляют собой почвенные комбинации. Так, в обобщенную единицу легенды объединены комбинации торфяных почв грядово-мочажинных болот с регрессивными явлениями, озерково-грядово-мочажинных болот и аапа болот, участки которых часто составляют единый болотный массив, в котором без детальных наземных обследований невозможно установить пространственную смену мезотрофных, олиготрофных почв и их влажного регрессивного подтипа. В свою очередь, торфяные почвы мерзлых бугров в почвенных сочетаниях плоско- и крупнобугристых комплексных болот показаны на карте по преобладающему компоненту – сухой регрессивной торфяной почве, приуроченной к плоским буграм. Встречающийся спорадически и занимающий незначительные пространства подтип торфяных реликтово-эвтрофных почв крупных бугров выведен за рамки легенды. Среди комбинаций минеральных почв, обусловленных пространственной литологической неоднородностью, выделены мозаики глееземов и подзолов.

Составленная почвенная карта парка “Нумто” (рис. 2) охватывает площадь 6 909.5 км². В таблице 1 также приведены данные, отражающие состав почвенного покрова.

Закономерности строения почвенного покрова парка “Нумто”

Составленная карта позволила выявить ряд закономерностей в строении почвенного покрова парка. Минеральные (постлитогенные) почвы сосредоточены, главным образом, в южной части парка, что связано с относительно меньшей заболоченностью северного макросклона Сибирских увалов.

Таблица 1. Легенда к карте парка “Нумто”

Table 1. Legend to the map of Numto Park

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченных разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
ЛЕСА						
1	Светлохвойные леса	Подзолы иллювиально-железистые (в том числе глееватые и оторфованные) карманистые и языковатые	11	4 784	11.11	76 764
2	Темнохвойные леса, в том числе с лиственницей (в основном на Сибирских увалах), формируются в условиях повышенного увлажнения под сосново-кедровыми, елово-лиственничными кустарничково-лишайниково-моховыми заболоченными лесами на литологически неоднородных породах	Мозаики таежных глееземов оторфованных и подзолов иллювиально-железистых, в том числе глееватых и оторфованных	4	16 599	7.3	50 451

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченных разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
3	Вторичные светлохвойные с участием сосны леса	Подзолы с включением глееземов пирогенные	1	2 840	0.87	6 036
БОЛОТА						
4	Крупнобугристые и плоскобугристые комплексные болота и талые лишайниковые болота	Сочетание торфяных олиготрофных сухих регрессивных, преимущественно маломощных и среднемощных (на буграх), и торфяных олиготрофных, преимущественно среднемощных и мощных (в мочажинах), почв	37	2 565	9.41	65 014

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченных разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
5	Олиготрофные сосново-кустарничково-сфагновые болота (рямы) и грядово-мочажинные комплексные болота	Торфяные олиготрофные, преимущественно маломощные почвы	73	7 116	36.29	250 740
6	Олиготрофные грядово-мочажинные с регрессивными явлениями, грядово-мочажинно-озерковые и аапа болота	Торфяные олиготрофные, преимущественно маломощные и среднечисленные почвы с включениями торфяной олиготрофной влажной регрессивной и мезотрофной торфяной почв	27	2 317	7.1	49 068

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченных разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
7	Мезотрофные болота (низкие аллювиальные террасы и притеррасные поймы, крупные ложбины стока, в т.ч. в истоках рек, поймы ручьев и т.д.).	Торфяные мезотрофные, преимущественно среднемошные и мощные почвы	22	1 762	5.92	40 897
8	Согры (эвтрофные и мезоэвтрофные древесные пойменные болота)	Сочетание торфяных эвтрофных маломощных, среднемошных и мощных (в межгрядных понижениях) и эвтрофных торфяно- и торфянисто-глеевых (на грядках) почв	11	–	1.85	12 776

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченных разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
9	Пойма Казыма	Сочетание аллювиальных дерново-глеевых (в том числе оподзоленных), иловато-торфяно- и торфянисто-глеевых (на гривах) и торфяных эвтрофных преимущественно маломощных и среднемощных (в межгрядных понижениях) почв	5	–	2.37	16 391
10	Хасыреи	Торфяные мезотрофные и эвтрофные слаборазвитые и торфянисто-глеевые почвы	20	–	0.8	5 517

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

№ на карте	Ландшафты	Почвы	Количество точек обучающей выборки		Площади, занимаемые почвами (по данным цифровой почвенной карты)	
			Обеспеченных разрезами и геоботаническими описаниями	Количество использованных для обучения пикселей	%	га
11	НАРУШЕННЫЕ ПЛОЩАДКИ И НАСЫПИ		–	1 074	0.23	1 578
12	ВОДОЕМЫ		–	18 875	16.75	115 718
Всего:			211	60 772	100	690 950

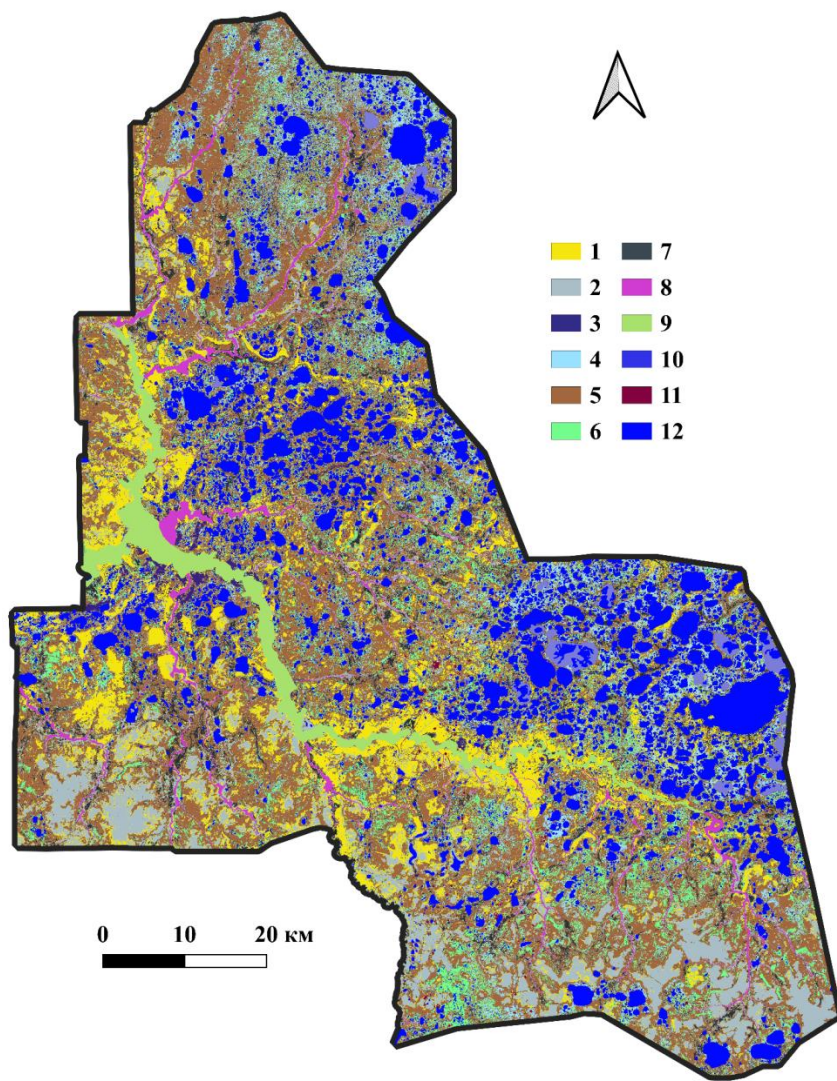


Рис. 2. Цифровая почвенная карта парка “Нумто”. Условные обозначения приведены под соответствующими номерами легенды в табл. 1.

Fig. 2. Digital soil map of Numto Park. Legend is given under the corresponding numbers in Table 1.

Основные массивы глееземов в мозаиках с подзолами приурочены к наиболее расчлененной их части, протягивающейся вдоль главной гряды возвышенности. Гомогенные контуры подзолов, сформированные на песчаных отложениях, в целом преобладают над мозаиками глееземов и подзолов и имеют тенденцию к доминированию на более пологих склонах увалов. Крупные контуры подзолов представлены на террасах субширотной части долины верхнего течения Казыма. Почвенные сочетания плоско- и крупнобугристых болотных комплексов занимают локальные водоразделы и слабодренированные заозеренные территории. Их роль в структуре почвенного покрова особенно усиливается в северной и центральной частях парка. Олиготрофные торфяные почвы являются фоновым компонентом почвенного покрова парка (см. табл. 1). Большие пространства заняты этими почвами в долинах крупных рек, а в южной части парка они распространены на относительно мало дренированных склонах водоразделов. Комплексы олиготрофных торфяных (в т. ч. влажных регрессивных) и мезотрофных торфяных почв отмечаются в довольно разнообразных ландшафтных позициях, в основном в виде вкраплений в массивы торфяных олиготрофных почв. В расчлененной части Сибирских увалов они занимают ложбины стока. Мезотрофные почвы распространены на первых низких террасах долин крупных рек, а также нередко во внутриболотных ложбинах стока мерзлых бугристых комплексных болот. Преобладающие по площади комплексы и сочетания почв хасыреев распространены к северу от долины Казыма.

Проблемы в отображении различных компонентов почвенного покрова на цифровой карте

Обобщая опыт построения и верификации цифровой почвенной карты парка “Нумто”, важно отметить, что достоверность отображения разных почвенных выделов неодинакова. Наибольшие сложности при картографировании вызвали территории комплексных болот и таежно-болотные экотоны.

При анализе контуров мозаик глееземов и подзолов (№ 2 в легенде) обращает на себя внимание высокая степень достоверности их выделения в районе Сибирских увалов. Специфика отобра-

жения на космических снимках этих территорий обусловлена такими характеристиками древостоя, как более высокие для района исследований показатели бонитета и сомкнутости крон, разнообразие породного состава (сосна, кедр, лиственница, береза, осина, ель), что, в свою очередь, определяется распространением здесь, в том числе, и суглинистых почвообразующих пород. Помимо основной гряды Сибирских увалов, мозаиками глееземов и подзолов также заняты разрозненные минеральные гривы, встречающиеся севернее увалов и также отличающиеся сравнительно высоким бонитетом и сомкнутостью древостоя произрастающих на них лесов.

К проблемным контурам, нередко отображающимся как мозаики глееземов с подзолами, могут относиться участки торфяных, торфяно- и торфянисто-глеевых эвтрофных почв в сограх пониженной равнинной части парка. “Шум”, создаваемый одиночными пикселями, характерными для мозаик глееземов и подзолов, также проявляется внутри ареалов, где обычно преобладают мезотрофные торфяные почвы под травяными березняками (из березы белой), расположенными на приозерных террасах или на отдельных внутриболотных грядах. На самом севере парка “шум” пикселей, отображающих мозаики глееземов и подзолов, возникает на мерзлых буграх (см. табл. 2, пример 4), имеющих своеобразные характеристики: в составе покрывающей их растительности преобладают кустарничково-зеленомошные группировки с возможным вкраплением облесенных участков, чередующиеся с мелкими термокарстовыми озерками. Бугры такого типа в южной и центральных частях парка отсутствуют, на участках мерзлых бугров этих территорий пиксели мозаик глееземов и подзолов встречаются редко и единично.

Контуры с подзолами (№ 1 в легенде) отображаются на карте в общем удовлетворительно. При этом худшие результаты отмечены для слабо облесенных сосной грив (с лесами паркового типа). На таких участках пиксели подзолов могут подменяться пикселями, соответствующими по спектральным характеристикам почвам плоскобугристых комплексных болот. Появление пикселей, характерных для подзолов, заметно также на механически нарушенных участках (зимники, геофизические просеки и др.),

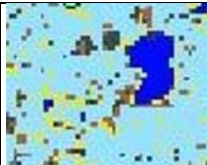
насыпях, на песчаных отмелях крупных озер. В то же время участки с глееватыми подзолами – низкие минеральные гривы с сосняками-зеленомошниками, экотоны грив – нередко отображаются как торфяные олиготрофные почвы, характерные для рямов и других олиготрофных болот с неглубокой торфяной залежью.

Хорошо выделились торфяные олиготрофные, преимущественно маломощные почвы (№ 5 легенды). Подавляющая часть ареалов этих почв приурочена к рьям (сосредоточенным вокруг минеральных островов и на террасах рек) и грядово-мелко- и среднемочажинным болотам. В качестве примеси они присутствуют по периферии ложбин стока с доминированием мезотрофных почв. В отдельных случаях они отображались как олиготрофные почвы плоскобугристых болот.

Пониженная достоверность получена для почвенных выделов, занятых мерзлыми плоскобугристыми болотами (№ 4 легенды). Сложность выделения этих ареалов обусловлена комплексностью почвенного покрова данного ландшафта, определяемого размерами бугров, мочажин, их соотношением, наличием термокарстовых или регрессивных озерков, а также проточностью ерсей-мочажин. Такое значительное число факторов приводит к возникновению комбинаций из пикселей, чаще всего имеющих вид мозаичного рисунка, особого в каждом конкретном случае (табл. 2). В ряде ситуаций часть ареалов почвенных комбинаций плоскобугристых комплексов замещается на гомогенные контуры торфяных олиготрофных почв, характерных для рямов и грядово-мочажинных болот, а также почв, распространенных на комплексных болотах с проявлениями регресса и наличием мезотрофных почв (табл. 2, пример 3). Хорошо выявляются, в соответствии с разработанной легендой, почвенные выделы (почвенные сочетания) комплексных плоскобугристых болот с заметным доминированием доли бугров (занимающих более 70% пикселя). Присутствие озерков может осложнять распознавание почв, так как в этом случае проявляется сходство с почвами регрессивных талых болот, также имеющих внутриболотные озерки.

Таблица 2. Примеры мозаичного рисунка из пикселей, возникших при создании карты на участках плоскобугристых болот (рис. 1–4)

Table 2. Examples of pixel mosaic patterns created during the mapping in areas of flat mound bogs (Fig. 1–4)

	1. Болотный комплекс с выраженным преобладанием плоских бугров (бугры занимают 70–80%) с лишайниковым покровом, примесь пикселей типа “подзол” свойственна для участков с лишайниками.
	2. Болотный комплекс с сочетанием бугров (бугры занимают до 40–50%), мочажин и крупных озерков. В талых понижениях появляется сочетание пикселей, характерных для олиготрофных торфяных почв (необовинные мочажины) и участков с почвами, характерными для регрессивных мочажин с озерками.
	3. Комплекс плоско- и крупнобугристого болота с проточной мочажиной по ложбине стока (для нее свойственна примесь пикселей мезотрофных почв).
	4. Типичный мозаичный рисунок, характерный для массивов плоскобугристых болот на северо-востоке парка (бугры занимают менее 40% площади). Отличается пестротой, проявляющейся в сочетании пикселей разнообразных болот.

Кроме того, в ареалы мерзлых бугров на цифровой карте нередко оказываются включенными маломощные торфяные и торфяно-глеевые почвы лишайниковых слабо облесенных талых болот, имеющие определенное распространение на территории парка (Веревкина, Лапшина, 2018).

На юге парка мерзлые бугры могут присутствовать в виде отдельных вкраплений в составе комплексных олиготрофных грядово-мочажинных болот (ГМК). В этом случае на карте они включаются в гомогенные ареалы олиготрофных торфяных почв. Следует отметить, что выбранный масштаб и методика картографирования не позволяют интерпретировать явления деградации мерзлых бугров, происходящие в условиях глобального изменения климата на крайней южной границе криолитозоны Западной Сибири, к которой как раз и относится территория парка “Нумто” (Губарьков, Московченко, 2023).

Также сложной задачей представляется отображение почв болотных комплексов олиготрофных торфяных (в том числе влажных регрессивных) и мезотрофных торфяных почв (№ 6 легенды). Возможно, что для более полного выявления регресса необходимо учитывать разновременные снимки (в первую очередь летних месяцев и лет с более сильным обводнением болот). Определенное значение имеет ориентированность гряд: так неориентированные перпендикулярно стоку гряды на отдельных массивах были показаны как участки с почвами мерзлых бугров, а ориентированные – как почвы грядово-мочажинных комплексных болот с проявлениями регресса. Почвы регрессивных болотных комплексов (№ 6 легенды) могут отображаться на месте сухих регрессивных почв бугристых торфяников. Обычно это происходит на болотах с мелкоконтурностью бугров (размерами до одного пикселя).

К наиболее достоверно выделяемым относятся крупные ареалы мезотрофных почв (№ 7 легенды). Хорошо отображаются занятые ими ложбины стока, участки в долинах рек, проточные ерсеи, широкие термокарстовые провалы. Неопределенности в этом случае могут создавать мелкоконтурность и наличие экотон.

Верификация цифровой карты

1) *Оценка точности в плагине SCP с созданием случайных стратифицированных точек (stratified random points).* Для почвенных макрокласов максимальная точность производителя составляла 89% в случае торфяных олиготрофных регрессивных почв грядово-мочажинных комплексов (№ 6 в легенде), минимальная – 41% для торфяных олиготрофных почв мерзлых бугров (№ 4 в легенде). Точность пользователя принимала максимальное значение в 79% для класса мезотрофных почв (№ 7 в легенде), минимальное – 58% для мозаики глееземов и подзолов (№ 2 в легенде) (табл. 3). Средняя общая точность карты составила 76.1%. Полученное значение является положительным результатом для метода Random Forest с учетом неоднородности почвенного покрова и сложности его дешифрирования по фитоиндикационным признакам и сопоставимо с результатами, приведенными для построенной с использованием нейросетей цифровой карты экосистем парка “Нумто” (Московченко, 2024).

2) *Оценка точности цифровой почвенной карты проводилась с использованием детальных почвенных карт.* Всего площадь исследуемой территории составила 6 909.5 км², площадь ключевых участков – 6.52 км². Для оценки точности рассчитывалась общая точность картографирования: отношение общего числа пикселей с совпавшими почвами к общему числу пикселей ключевого участка (Congalton, 1991). По результатам расчетов средняя общая точность для всех участков составила 75%, медианная точность – 78%, максимальная точность – 95% и минимальная точность – 34% (табл. 4). Среднее линейное отклонение составило 11%, стандартное отклонение – 14%.

3) *Оценка точности построенной карты с использованием полевой верификации.* Наибольшее количество точек соответствовало торфяным олиготрофным почвам талых биогеоценозов (комплексных грядово-мочажинных и сосново-кустарничково-сфагновых болот), что отражает их распространение на территории парка. По результатам проведенной экспертной оценки точность цифровой карты составила 78.4%.

Таблица 3. Результаты оценки точности цифровой карты в плагине SCP
Table 3. Results of digital map accuracy evaluation in SCP plugin

Почвы (перечень приводится в сокращенном варианте, полный вариант приведен в таблице 1)	Точность пользователя, %	Точность производителя, %
Подзолы иллювиально-железистые (в том числе глееватые и оторфованные) карманистые и языковатые	77	79
Мозаики таежных глееземов оторфованных и подзолов иллювиально-железистых, в том числе глееватых и оторфованных	58	82
Подзолы с включением глееземов пирогенные	67	100
Сочетание торфяных олиготрофных сухих регрессивных, преимущественно маломощных и среднемощных (на буграх), и торфяных олиготрофных, преимущественно среднемощных и мощных (в мочажинах), почв	63	41
Торфяные олиготрофные преимущественно маломощные почвы	78	73
Торфяные олиготрофные, преимущественно маломощные и среднемощные почвы с включениями торфяной олиготрофной влажной регрессивной и мезотрофной торфяной почв	52	89
Торфяные мезотрофные, преимущественно среднемощные и мощные почвы	79	71

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

Почвы (перечень приводится в сокращенном варианте, полный вариант приведен в таблице 1)	Точность пользователя, %	Точность производителя, %
Сочетание торфяных эвтрофных маломощных, среднемощных и мощных (в межгрядных понижениях) и эвтрофных торфяно- и торфянисто-глеевых (на гривах) почв	85	77
Сочетание аллювиальных дерново-глеевых (в том числе оподзоленных), иловато-торфяно- и торфянисто-глеевых (на гривах) и торфяных эвтрофных, преимущественно маломощных и среднемощных (в межгрядных понижениях), почв	95	95
Торфяные мезотрофные и эвтрофные слаборазвитые и торфянисто-глеевые почвы	100	78
Песчаные насыпи и дороги	88	94
Водоемы	86	96

Таблица 4. Результаты оценки точности на ключевых участках на основе сопоставления цифровой почвенной карты и детальных почвенных карт микроключей бассейна Казыма, построенных традиционным методом полевой съемки

Table 4. Results of accuracy assessment in key areas based on comparison of digital soil map and detailed soil maps of microkeys of the Kazym basin compiled by traditional field survey method

Ключевой участок	Почвы (обозначения соответствуют номерам легенды, см. табл.1)	Количество пикселей, в которых почвы совпали	Количество пикселей на участке (всего)	Общая точность, %
1	1, 5	107	137	78
2	1, 4, 5, 6	152	211	72
3	1, 5	104	129	81
4	3, 5, 6	83	136	61
5	1, 5, 6	193	247	78
6	1, 5, 7	109	153	71
7	1, 5, 6	68	134	51
8	5, 6	157	169	93
9	1, 5, 6, 12	113	182	62
10	1, 5, 6, 12	52	77	66
11	1, 5, 4, 12	106	126	84
12	1, 5	32	58	55
13	4, 5, 6, 7, 12	108	133	88
14	5, 7, 12	72	88	82
15	2, 5	136	153	89
16	5, 7, 12	19	59	34
17	2, 5, 7	111	140	69
18	6	80	93	86
19	1, 5	29	42	69
20	1, 5	126	197	64
21	2, 5, 7	34	48	71
22	4, 5, 6	96	103	95
23	4, 7	89	103	86
24	5, 4	99	112	88
25	2, 5	46	58	79
26	5, 6	62	75	72
27	4	78	86	85
28	4	128	197	65
29	5	51	61	84
30	5, 7	136	146	93

Наименее достоверно оказались отображены ареалы почв плоскобугристых комплексов. Максимальная точность отображения была обнаружена для ареалов подзолов, полностью подтвержденных при полевой верификации.

ВЫВОДЫ

Верификация цифровой почвенной карты “Нумто” и сопредельных территорий различными методами показала достаточно высокую ее общую точность, составившую от 75.0% до 78.4%.

Информативность почвенной карты была повышена за счет включения в состав легенды среднемасштабной карты таких единиц картографирования как мезотрофные почвы, почвы влажных регрессивных болот, почвы хасырейных комплексов.

По данным цифровой карты наибольшее распространение на территории парка получили талые олиготрофные торфяные почвы (43.5%); подзолы (13.34%); сочетания олиготрофных торфяных почв плоскобугристых и крупнобугристых комплексных болот (11.3%); комплексы олиготрофных торфяных (в том числе влажных регрессивных) и мезотрофных торфяных почв (8.3%) и мезотрофные почвы (7.1%).

Наибольшую сложность вызывает почвенное картографирование комплексных болот и лесоболотных экотонов. В особенности это касается отображения почв мелкоконтурных плоскобугристых торфяников, чередующихся с талыми комплексными болотами с доминированием лишайников на повышенных элементах болотного рельефа.

Примененный в настоящей работе подход может быть использован при картографировании обширных территорий северной тайги и лесотундры Западно-Сибирской низменности на основе спутниковых данных Landsat-8 с учетом существующего в настоящее время дефицита почвенно-картографических материалов для этого региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветов Н.А., Трофимов С.Я. Почвенный покров таежных и пойменных ландшафтов бассейна р. Пякупор Западной Сибири // Почвоведение. 1997. № 1. С. 31–35.

2. *Аветов Н.А., Шишонакова Е.А., Кинжаев Р.Р., Арзамазова А.В.* Структура почвенного покрова заболоченной равнины северо-таежной подзоны Западной Сибири (бассейн р. Казым) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 208–218. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020046>.
3. *Ахметова Г.В., Токарев П.Н.* Использование ГИС-технологий для идентификации болотных почв при обновлении электронной почвенной карты Карелии // ИнтерГИС. 2020. Т. 26. № 2. С. 66–78. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-66-78>.
4. *Валеева Э.И., Московченко Д.В., Арефьев С.П.* Природный комплекс парка “Нумто”. Новосибирск: Институт проблем освоения Севера СО РАН, 2008. 280 с.
5. *Векишина В.Н.* Построение цифровых моделей почвенного покрова западной части Большеземельской тундры // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 99. С. 21–46. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-99-21-46>.
6. *Веревкина Е.Л., Лапшина Е.Д.* Мир болот природного парка “Нумто”. Характеристика, типология и значение для устойчивого развития. Екатеринбург: “Ассорти”, 2019. 50 с.
7. *Гаджиев И.М., Овчинников С.М.* Почвы средней тайги Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1977. 152 с.
8. *Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.
9. *Грибов С.И., Гасков С.И., Опрышко Н.Ф.* Структуры почвенного покрова земельных угодий Ханты-Мансийского автономного округа // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2004. № 4. С. 36–40.
10. *Добровольский Г.В., Никитин Е.Д., Афанасьева Т.В.* Таежное почвообразование в континентальных условиях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 216 с.
11. *Долгова Л.С., Гаврилова И.П.* Особенности почв средне-и северотаежных подзон Западной Сибири (в пределах Тюменской области) // Природные условия Западной Сибири. 1971. Вып. 1. С. 77–90.
12. *Евдокимова Т.И.* Почвенная съемка. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 269 с.
13. *Караваева Н.А.* Почвы тайги Западной Сибири. М.: Наука, 1973. 167 с.
14. *Каверин Д.А., Шахтарова О.В., Пастухов А.В., Мажитова Г.Г., Лаптева Е.М.* Составление крупномасштабных почвенных карт ключевых участков в тундре и лесотундре северо-востока Европейской России // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 140–146.
15. *Ковалев Р.В., Волковинцев В.И., Гаджиев И.М., Корсунов В.М., Курачев В.М., Хмелев В.А.* Основные черты почвообразования и

особенности почв Западно-Сибирской равнины и ее горного юго-восточного окаймления // Доклады сибирских почвоведов к X Международному конгрессу почвоведов. Новосибирск: Наука, 1974. С. 36–53.

16. *Коркина Е.А., Стреляева А.С., Нестерова К.В.* Геоинформационный анализ почвенного покрова Среднего Приобья // География и геоэкология на службе науки и инновационного образования. Мат-лы международной науч.-практич. конф., посвященной Всемирному Дню Земли и 100-летию заповедной системы России. Красноярск, 2016. С. 71–74.

17. *Московченко Д.В., Губарьков А.А.* Температурные режимы почв на южной границе зоны мерзлых болот в Западной Сибири // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 23–51. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-23-51>.

18. *Московченко Д.В., Козин В.В.* Ландшафтно-экологическое картографирование территории природного парка “Нумто” (ХМАО-Югра) // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития. Материалы XII Международной ландшафтной конференции. Т. 1. Тюмень: Тюменский гос. университет. 2017. С. 220–222.

19. *Московченко М.Д.* Применение методов машинного обучения для картографирования типов болот на территории природного парка “Нумто” (Западная Сибирь) // Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны. Материалы V международного научного семинара. Минск: ИВЦ Минфина, 2024. С. 110–116.

20. *Смоленцев Б.А.* Структура почвенного покрова Сибирских Увалов (северотаежная подзона Западной Сибири). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 118 с.

21. *Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Курбатова Ю.А., Максюттов Ш.* Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 920–930. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556620060102>.

22. *Терещенков О.М., Кутыев Х.А., Попов Е.Н.* Почвенно-экологические карты нефтедобывающих регионов Западной Сибири и методы их составления // Современные проблемы географии и картографии почв. Материалы (тезисы) Всесоюзной конф. М.: ВАСХНИЛ, 1992. С. 67–68.

23. *Уфимцева К.А.* Почвы южной части таежной зоны Западно-Сибирской равнины. М.: Колос, 1974. 206 с.

24. *Фирсова В.П.* Почвы таежной зоны Урала и Зауралья. М.: Наука,

1977. 176 с.

25. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова мира. М.: Мысль, 1984. 235 с.

26. Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В. Болотные торфяные почвы таежной и подтаежной зон Западной Сибири на цифровой модели почвенной карты России масштаба 1 : 2 500 000 в формате классификации почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 223–240. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-223-240>.

27. Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Толпышева Т.Ю. Торфяные почвы бореальных регрессивных болот Западной Сибири: проблемы биологической диагностики и систематики // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. Вып. 84. С. 61–74. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-61-74>.

28. Belgiu M., Lucian D. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions // ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2016. Vol. 114. P. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.

29. Congalton R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data // Remote sensing of environment. 1991. Vol. 37. No. 1. P. 35–46.

30. Olofsson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change // Remote sensing of Environment. 2014. Vol. 148. P. 42–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.

31. Heung B., Hung Chak Ho, Zhang J., Knudby A., Bulmer C.E., Schmidt M.G. An overview and comparison of machine-learning techniques for classification purposes in digital soil mapping // Geoderma. 2016. Vol. 265. P. 62–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.014>.

32. Wadoux A.M.J.-C., Minasny B., McBratney A.B. Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions // Earth-Science Reviews. 2020. Vol. 210. 103359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>.

33. van der Westhuizen S., Heuvelink G.B.M., Hofmeyr D.P. Multivariate random forest for digital soil mapping // Geoderma. 2023. Vol. 431. 116365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116365>.

REFERENCES

1. Avetov N.A., Trofimov S.Ya., Pochvennyi pokrov taezhnykh i poimennykh landshaftov basseina r. Pyakupur Zapadnoi Sibiri (Soil cover of

taiga and floodplain landscapes of the Pyakupur River basin in Western Siberia), *Pochvovedenie*, 1997, No.1, pp. 31–35.

2. Avetov N.A., Shishkonakova E.A., Kinzhaev R.R., Arzamazova A.V., *Struktura pochvennogo pokrova zabolochennoi ravniny severo-taezhnoi podzony Zapadnoi Sibiri (bassein r. Kazym) (The structure of the soil cover of the boggy plain of the northern taiga subzone of Western Siberia (Kazym River basin))*, *Pochvovedenie*, 2022, No. 2, pp. 208–218, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020046>.

3. Akhmetova G.V., Tokarev P.N., *Ispol'zovanie GIS-tekhnologii dlya identifikatsii bolotnykh pochv pri obnovenii elektronnoi pochvennoi karty Karelii (Using GIS technologies to identify mire soils in updating the electronic soil map of Karelia)*, *InterKarto. InterGIS*, 2020, Vol. 26, No. 2, pp. 66–78. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-66-78>.

4. Valeeva E.I., Moskovchenko D.V., Aref'ev S.P., *Prirodnyi kompleks parka "Numto" (Nature complex of the park "Numto")*, Novosibirsk: Institut problem osvoeniya Severa SO RAN, 2008, 280 p.

5. Vekshina V.N., The development of digital models of the soil cover in the western part of Bol'shezemel'skaya tundra, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, No. 99, pp. 21–46, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-99-21-46>.

6. Verevkina E.L., Lapshina E.D., *Mir bolot prirodnogo parka "Numto". Kharakteristika, tipologiya i znachenie dlya ustoichivogo razvitiya (The World of wetlands in the Numto Nature Park. Characteristics, typology and significance for sustainable development)*, Ekaterinburg: "Assorti", 2019, 50 p.

7. Gadzhiev I.M., Ovchinnikov S.M., *Pochvy srednei taigi Zapadnoi Sibiri (Soils of the middle taiga of Western Siberia)*, Novosibirsk: Nauka, 1977, 152 p.

8. Goryachkin S.V., *Pochvennyi pokrov Severa (struktura, genezis, ekologiya, evolyutsiya) (Soil cover of the North (structure, genesis, ecology, evolution))*, Moscow: GEOS, 2010, 414 p.

9. Gribov S.I., Gas'kov S.I., Opryshko N.F., *Struktury pochvennogo pokrova zemel'nykh ugodii Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga (Soil cover structures of lands of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug)*, *Vestnik Altaiskogo gos. agrarnogo un-ta*, 2004, No. 4, pp. 36–40.

10. Dobrovolskii G.V., Nikitin E.D., Afanas'eva T.V., *Taezhnoe pochvoobrazovanie v kontinental'nykh usloviyakh (Taiga soil formation in continental conditions)*, Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1981, 216 p.

11. Dolgova L.S., Gavrilova I.P., *Osobennosti pochv sredne-i severotaezhnykh podzon Zapadnoi Sibiri (v predelakh Tyumenskoi oblasti) (Peculiarities of soils of the middle and northern taiga subzones of Western Siberia (within the Tyumen region))*, In: *Prirodnye usloviya Zapadnoi Sibiri (Natural conditions*

of Western Siberia), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1971, Vol. 1, pp. 77–90.

12. Evdokimova T.I., *Pochvennaya s'emka* (Soil survey), Moscow: Izd-vo MGU, 1987, 269 p.

13. Karavaeva N.A., *Pochvy taigi Zapadnoi Sibiri* (Soils of the taiga of Western Siberia), Moscow: Nauka, 1973, 167 p.

14. Kaverin D.A., Shakhtarova O.V., Pastukhov A.V., Mazhitova G.G., Lapteva E.M., *Sostavlenie krupnomasshtabnykh pochvennykh kart klyuchevykh uchastkov v tundre i lesotundre severo-vostoka Evropeiskoi Rossii* (Compilation of large-scale soil maps of key areas in the tundra and forest-tundra of northeastern European Russia), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2012, No. 3, pp. 140–146.

15. Kovalev R.V., Volkovintser V.I., Gadzhiev I.M., Korsunov V.M., Kurachev V.M., Khmelev V.A., *Osnovnye cherty pochvoobrazovaniya i osobennosti pochv Zapadno-Sibirskoi ravniny i ee gornogo yugo-vostochnogo okaimleniya* (The main features of soil formation and soil characteristics of the West Siberian Plain and its mountainous southeastern border), In: *Doklady sibirskikh pochvovedov k X Mezhdunarodnomu kongressu pochvovedov* (Reports of Siberian soil scientists to the 10th International Congress of Soil Scientists), Novosibirsk: Nauka, 1974, pp. 36–53.

16. Korkina E.A., Strelyaeva A.S., Nesterova K.V., *Geoinformatsionnyi analiz pochvennogo pokrova Srednego Priob'ya* (Geoinformation analysis of the soil cover of the Middle Ob region), *Geografiya i geoekologiya na sluzhbe nauki i innovatsionnogo obrazovaniya* (Geography and Geoecology in the Service of Science and Innovative Education), Proc. International Scientific and Practical Conference Dedicated to the World Earth Day and the 100th Anniversary of the Russian Nature Reserve System, Krasnoyarsk, 2016, pp. 71–74.

17. Moskovchenko D.V., Gubarkov A.A. Soil temperature regimes on the southern border of the zone of frozen bogs in Western Siberia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, No. 117, pp. 23–51, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-23-51>.

18. Moskovchenko D.V., Kozin V.V., *Landshaftno-ekologicheskoe kartografirovanie territorii prirodnogo parka "Numto" (KhMAO-Yugra)* (Landscape-ecological mapping of the territory of the Naturt Park "Numto" (Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra)), In: *Landshaftovedenie: teoriya, metody, landshaftno-ekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovaniya i ustoichivogo razvitiya* (Landscape science: theory, methods, landscape-ecological support for nature management and sustainable development), Proc. XIIth International Landscape Conference, Tyumen': Tyumenskii gos. universitet, 2017, Vol. 1, pp. 220–222.

19. Moskovchenko M.D., *Primenenie metodov mashinnogo obucheniya dlya kartografirovaniya tipov bolot na territorii prirodnogo parka "Numt"*

(Zapadnaya Sibir') (Application of Machine Learning Methods for Mapping Wetland Types in the Numto Nature Park (Western Siberia)), In: *Rastitel'nost' bolot: sovremennyye problemy klassifikatsii, kartografirovaniya, ispol'zovaniya i okhrany* (Vegetation of mires: modern problems of classification, mapping, use and protection), Proc. 5th International scientific seminar, Minsk: IVTs Minfina, 2024, pp. 110–116.

20. Smolentsev B.A., *Struktura pochvennogo pokrova Sibirskikh Uvalov (severotaezhnaya podzona Zapadnoi Sibiri)* (Soil cover structure of the Siberian Ridges (northern taiga subzone of Western Siberia)), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2002, 118 p.

21. Terent'eva I.E., Filippov I.V., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kurbatova Yu.A., Maksyutov Sh., Kartografirovaniye taezhnykh bolot Zapadnoi Sibiri na osnove distantsionnoi informatsii (Mapping of taiga mires of Western Siberia based on remote sensing information), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2020, Vol. 84, No. 6, pp. 920–930, DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556620060102>.

22. Tereshchenkov O.M., Kutyev Kh.A., Popov E.N., Pochvenno-ekologicheskie karty nefte dobyvayushchikh regionov Zapadnoi Sibiri i metody ikh sostavleniya (Soil-ecological maps of oil-producing regions of Western Siberia and methods of their compilation), In: *Sovremennyye problemy geografii i kartografii pochv* (Modern Problems of Soil Geography and Cartography), Proc. All-Union Conference, Moscow: VASKhNIL, 1992, pp. 67–68.

23. Ufimtseva K.A., *Pochvy yuzhnoi chasti taezhnoi zony Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Soils of the southern part of the taiga zone of the West Siberian Plain), Moscow: Kolos, 1974, 206 p.

24. Firsova V.P., *Pochvy taezhnoi zony Urala i Zaural'ya* (Soils of the taiga zone of the Urals and Trans-Urals), Moscow: Nauka, 1977, 176 p.

25. Fridland V.M. *Struktura pochvennogo pokrova mira* (Soil cover structure of the world), Moscow: Mysl', 1984, 235 p.

26. Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Mire peat soils of the taiga and sub-taiga zones of West Siberia on a digital model of the soil map of Russia at a scale of 1 : 2 500 000 in terms of the Russian soil classification, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, No. 104, pp. 223–240, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-223-240>.

27. Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Tolpysheva T.Yu., Peat soils of boreal regressive bogs in West Siberia: Problems of biological diagnostics and systematics, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, No. 84, pp. 61–74, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-61-74>.

28. Belgiu M., Lucian D., Random forest in remote sensing: A review of

- applications and future directions, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2016, Vol. 114, pp. 24–31, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.
29. Congalton R.G., A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote sensing of environment*, 1991, Vol. 37, No. 1, pp. 35–46.
30. Heung B., Hung Chak Ho, Zhang J., Knudby A., Bulmer C.E., Schmidt M.G., An overview and comparison of machine-learning techniques for classification purposes in digital soil mapping, *Geoderma*, 2016, Vol. 265, pp. 62–77, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.014>.
31. Olofsson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change, *Remote sensing of environment*, 2014, Vol. 148, pp. 42–57, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.
32. Wadoux A.M.J.-C., Minasny B., McBratney A.B., Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions, *Earth-Science Reviews*, Vol. 210, 2020, 103359, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>.
33. van der Westhuizen S., Heuvelink G.B.M., Hofmeyr D.P., Multivariate random forest for digital soil mapping, *Geoderma*, 2023, Vol. 431, 116365, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116365>.