

УДК 631.471

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-21-46

**Ссылки для цитирования:**

Векшина 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: 10.19047/0136-1694-2019-99-21-46

**Cite this article as:**

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, V. 99, pp. 21-46, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-21-46

## **Построение цифровых моделей почвенного покрова западной части Большеземельской тундры**

© 2019 г. В. Н. Векшина

*МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,  
119234, Москва, Ленинские Горы, 1*

*<https://orcid.org/0000-0002-5662-7975>, e-mail: [LeraVekshina@mail.ru](mailto:LeraVekshina@mail.ru).*

*Поступила в редакцию 10.06.2019, после доработки 20.11.2019,  
принята к публикации 21.11.2019*

**Резюме:** Методы цифровой картографии перспективны для создания почвенных карт труднодоступных территорий. Целью работы был поиск оптимальных подходов к построению цифровых моделей почвенного покрова слабо изученной западной части Большеземельской тундры и лесотундры в разных масштабах. В качестве базовой информации о почвах использовались средне- (1 : 200 000) и мелкомасштабные (1 : 1 млн) почвенные карты; актуальная информация о состоянии территории бралась со снимков Landsat 8 (14.08.2013) и модели рельефа ASTER GDEM v.2. После извлечения информации и подбора предикторов проводился анализ моделей, построенных различными алгоритмами – Random Forest (RF), Multinomial Logistic Regression (MLR) и Linear Discriminant Analysis (LDA). Оценивался коэффициент согласованности между построенными моделями и изначальными картами (индекс каппа). Тестирование моделей показало, что лучше всего работает алгоритм Random Forest, который и был выбран для построения конечных карт. Средние значения каппа для сравниваемых моделей мелко- и среднемасштабных карт составили: RF – 0.39 и 0.36;

MLR – 0.31 и 0.31; LDA – 0.28 и 0.18 соответственно. После предварительной коррекции контурной и смысловой части среднемасштабной карты значения каппа выросли: RF – 0.39, MLR – 0.35, LDA – 0.30. Проверка новых цифровых карт по независимым полевым данным показала, что уровень совпадения данных не хуже, чем у исходных бумажных карт: для исходной мелкомасштабной карты – 24 %, а цифровой – 26 %; для исходной среднемасштабной карты – 54 %, а цифровой – 43 %. При предварительной коррекции исходной среднемасштабной карты уровень совпадения полевых данных и цифровой модели, построенной с помощью алгоритма RF, повысился до 61 %. Данный способ построения цифровой почвенной карты при аналогичных исходных данных представляется оптимальным.

**Ключевые слова:** цифровые почвенные карты (DSM), тундрово-таежный экотон, дистанционные данные, Landsat 8, ASTER GDEM, LWCI, NDVI, MNDWI, Random Forest, оценка точности карт.

## The development of digital models of the soil cover in the western part of Bol'shezemel'skaya tundra

V. N. Vekshina

*Lomonosov Moscow State University,*

*1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,*

*<https://orcid.org/0000-0002-5662-7975>, e-mail: [LeraVekshina@mail.ru](mailto:LeraVekshina@mail.ru).*

*Received 10.06.2019, Revised 20.11.2019, Accepted 21.11.2019*

**Abstract:** The methods of digital mapping are promising for creating soil maps on difficultly accessible territories. This study was aimed at searching of optimal approaches for digital mapping of the soil cover in poorly studied western part of the Bol'shezemel'skaya tundra on different scales. Medium-scale (1 : 200 000) and small-scale (1 : 1 M) soil maps served as the source of initial information about soils of this region; actual information of the state of the territory was obtained from remote sensing data (Landsat 8 scenes, Aug. 14, 2013) and digital elevation model ASTER GDEM v.2. After extraction of information and the choice of predictors, the analysis of digital soil cover models obtained with the use of different algorithms – Random Forest (RF), Multinomial Logistic Regression (MLR) and Linear Discriminant Analysis (LDA) – was performed. The coefficient of agreement between the newly developed digital models and the initial paper-based soil maps (kappa) was calculated. This test demonstrated that the RF algorithm ensures the best results, so the final digital maps were obtained using it. Averaged kappa

values for the compared small- and medium-scale models were as follows: RF – 0.39 and 0.36; MLR – 0.31 and 0.31; and LDA – 0.28 and 0.18, respectively. After the preliminary correction of the initial medium-scale map, the kappa values somewhat increased (RF – 0.39, MLR – 0.35, LDA – 0.30). At the stage of evaluation of digital soil maps obtained with the use of RF algorithm, these maps and the initial soil maps were compared with independent point-size terrain data. The degree of agreement between these data and the new digital soil maps proved to be no less than that for the initial maps. For the initial and digital small-scale maps, it reached 24 and 26 %, respectively; for the initial and digital medium-scale maps, 54 and 43 %, respectively. After the preliminary correction of the initial medium-scale map, the degree of agreement between the digital model and terrain data improved considerably and reached 61 %. This method of digital soil mapping on the basis of analogous data seems to be optimal.

**Keywords:** digital soil maps, tundra-taiga ecotone, remote sensing data, Landsat 8, ASTER GDEM, LWCI, NDVI, MNDWI, Random Forest, map evaluation.

## ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития почвенной картографии связан с использованием компьютерных технологий, позволяющих анализировать большие объемы информации, включая первичные точечные полевые данные (полевые описания ландшафтов и почв, результаты анализа образцов), пространственные модели (различные тематические карты, модели рельефа) и данные дистанционного зондирования (ДДЗ), наиболее точно, но косвенно отражающие факторы почвообразования и организацию почвенного покрова. Выделилось направление цифровой почвенной картографии (ЦПК) ([Савин, 2016](#); Цифровая почвенная картография, 2012; Козлов, 2009; [McBratney et al., 2003](#)). Ставится задача по созданию мировой цифровой почвенной карты (точнее, серии карт отдельных свойств почв) с разрешением порядка 100 м, разрабатываются различные алгоритмы решения этой задачи в зависимости от имеющихся данных ([Arrouays et al., 2014](#)).

В основе ЦПК лежит традиционный анализ связей между почвами (или отдельными их свойствами), факторами почвообразования и характеристиками поверхности, но проводимый на количественной основе с использованием методов геостатистики.

Имеющиеся тематические карты и ДДЗ применяются для анализа территории, выявления признаков, наиболее существенных в изучаемой природно-климатической обстановке, с целью подбора величин – предикторов почв (почвенных свойств), – адекватно отражающих взаимосвязи почв и факторов почвообразования, их математической обработки и группировки для автоматического построения почвенной карты.

Способы применения ДДЗ в традиционном и цифровом картографировании различны. В первом случае ДДЗ используются в качестве обычной подложки для визуального дешифрирования почв ([Савин, Симакова, 2012](#)). Во втором – они используются для автоматического извлечения информации, значимой при создании карт и определяемой природно-климатическими особенностями района исследования и техническими возможностями. Конечным продуктом являются либо карты отдельных свойств почв ([Dharumarajan et al., 2017](#); [Vågen et al., 2016](#); [Grimm et al., 2008](#)), либо непосредственно сама почвенная карта ([Докучаев, 2017](#); [Жо-голев, 2016](#); [Abdel-Kader, 2011](#); [Конюшкова, Козлов, 2010](#)).

ДДЗ как источник информации имеет свои особенности, которые следует учитывать при создании карт того или иного масштаба. Как отмечено И.Ю. Савиным ([Савин, 2016](#)), использование косвенных дешифровочных признаков при создании мелко- и среднемасштабных карт оказалось более надежным, чем использование прямых дешифровочных признаков при крупномасштабном картографировании. Работа с косвенными признаками – в первую очередь с растительностью и рельефом – важна при построении уточненных цифровых моделей почвенного покрова на основе имеющихся бумажных карт ([Сухачева, 2019](#); [Савин, Овечкин, 2014](#)).

Для отечественного почвоведения эта задача особенно актуальна, так как полевые данные часто отсутствуют в достаточном количестве, зато имеется богатый архив почвенных карт прошлых лет ([Савин, Овечкин, 2014](#)). Бумажные почвенные карты разных масштабов составлены на всю территорию страны и являются основным источником данных о почвенном покрове. Материалы современных точечных полевых исследований используются для уточнения и проверки имеющейся информации.

Общей методики создания цифровых почвенных карт на основе имеющейся картографической информации, моделей рельефа и ДДЗ пока не существует. Очевидно, что выбор предикторов почвообразования и способов их анализа зависит от многих факторов, включая физико-географические особенности и связи *почва – факторы* для конкретной территории, доступность материалов, наличие новых полевых данных и др. Количество таких исследований для равнинных тундрово-таежных территорий с “закрытой” растительностью поверхностью почвы невелико. Для Европейского северо-востока они единичны ([Каверин, 2012](#)). Вместе с тем потребность в уточненных цифровых моделях почвенного покрова, увязанных с ДДЗ, для этих территорий высока и будет возрастать в связи с необходимостью дистанционного мониторинга трансформации природного комплекса и почв под воздействием возрастающего антропогенного пресса (в первую очередь развития нефтегазодобычи) и климатических изменений.

Этим определяется актуальность исследования. Его задачей была отработка подходов к построению и проверке цифровых почвенных карт тундрово-таежного экотона на основе имеющихся средне- и мелкомасштабных бумажных почвенных карт, цифровой модели рельефа и ДДЗ. Условно в работе можно выделить три этапа: 1) анализ связей *почва – факторы* и подбор предикторов почвообразования; 2) совместный анализ предикторов и построение цифровой модели почвенного покрова по определенному алгоритму; и 3) содержательный анализ полученных результатов, уточнение закономерностей почвообразования и географии почв для рассматриваемого региона. В данной статье преимущественно рассматривается второй этап – построение цифровых почвенных карт.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследуемый район расположен в центральной части Ненецкого автономного округа, в Субарктическом поясе, в пределах Печорской синеклизы. Климат умеренно-холодный гумидный, умеренно-континентальный, более мягкий в западной части в связи с обогревающим воздействием р. Печоры. Среднегодовые температуры воздуха  $-3\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; количество осадков – около 600 мм

([Научно-прикладной справочник по климату СССР, 1989](#)). Восточная часть расположена в зоне массивно-островной, а западная – островной мерзлоты ([Осадчая, Тумель, 2012](#)). Почвообразующими породами являются четвертичные отложения различного генезиса с преобладанием аллювиальных песков в западной части и ледниково-морских суглинков в восточной части (<http://www.vsegei.ru>). Междуречья заняты кустарниковыми моховыми и мохово-лишайниковыми тундрами в сочетании с плоскобугристыми болотами. Березово-еловые и сосновые лесные массивы с ерником и мохово-лишайниковым покровом занимают дренированные позиции на террасах рек. Злаково-осоковые луга, ивняки и моховые болота преобладают в поймах. Значительны массивы незакрепленных песков ([Лавриненко, 2013](#)). В почвенном покрове преобладают Al-Fe-гумусовые почвы (в западной части), глееземы, криометаморфические почвы, торфяные мерзлотные и немерзлотные почвы, аллювиальные гумусовые, гумусово-глеевые и торфяно-глеевые почвы и псаммоземы.

Изучение почвенного покрова проводилось на широтно-вытянутом участке местности (N 67°21'52", E 53°00'41" (юго-запад); N 67°48'36", E 55°12'29" (северо-восток)), рассматриваемом в мелком масштабе. В западной части исследуемой территории был выделен полигон (N 67°48'34", E 53°00'41" (юго-запад); N 67°21'54", E 53°59'54" (северо-восток)), границы которого определялись имеющейся среднемасштабной почвенной картой на эту территорию. На рисунке 1 показан космический снимок с границами исследуемой территории и полигона. Фиолетовым цветом выделена граница всей исследуемой территории, розовым цветом заштрихован полигон для изучения территории в разных масштабах.

*Источники информации.* Для создания цифровых почвенных карт мелкого (на весь участок) и среднего (на его западную часть) масштабов в качестве основного источника почвенной информации использованы листы ГПК масштаба 1 : 1 млн, листы Q-39 (1977) и Q-40 (1982), и почвенная карта Н.А. Крейды масштаба 1 : 200 000 (лист Q-39-V, VI) (1958), также были использованы сцены Landsat 8 за 14.08.2013, а также цифровая модель рельефа ASTER GDEM v. 2 (<http://viewfinderpanoramas.org/dem1d>). Для по-

нимания почвенно-ландшафтных связей на территории исследования была использована информация с топографических, ландшафтных, геологических и геокриологических карт и литературных источников.



**Рис. 1.** Район исследований.  
**Fig. 1.** Study area.

Полевые данные: описания 67 разрезов, полученные в 2014–2016 гг. и характеризующие наиболее распространенные в восточной и западной части территории типы почв, использовались при проверке базовых и цифровых почвенных карт.

На первом этапе все векторные (векторизованные базовые почвенные карты, точечные полевые данные) и растровые данные (каналы Landsat, цифровая модель рельефа ASTER GDEM v. 2) были сведены в единую ГИС (в программе QGIS). С помощью растровых данных рассчитывались ковариаты, подобранные на основании изученных почвенно-ландшафтных связей для территории исследования.

Для статистического анализа связей предиктор – почва, а также для подбора модели создания карты значения выбранных ковариат и названия почв с почвенных карт были взяты по регулярной сетке (три точки/км<sup>2</sup>), что обеспечило попадание точек во все выделенные почвенные контуры. Из дальнейших расчетов были исключены точки, попавшие на предварительно отдешифрованные водные объекты и массивы развеваемых песков. Всего в статистическую обработку для среднemasштабной карты попало

5715 точек (для 2091 км<sup>2</sup>), а для мелкомасштабной – 13014 точек (для 4638 км<sup>2</sup>). По результатам статистического анализа построена корреляционная матрица для подбора минимального количества ковариат с максимальной суммарной эффективностью, оценена способность отобранных предикторов к разделению общей совокупности почв (по критерию Миллса) и их парных комбинаций (по *t*-критерию).

В итоге для построения *среднемасштабной* почвенной карты были отобраны следующие индексы: абс. высота, LWCI, NDVI, температура (*t*) поверхности; для *мелкомасштабной карты* к этим предикторам был добавлен индекс MNDWI, помогающий отделить почвы на суглинках в восточной части полигона. Более подробно процедура подбора и анализа предикторов охарактеризована ранее (Векшина, 2019).

*Этап построения карт* включал в себя подбор алгоритма построения карты с помощью индекса каппа (Cohen 1960, 1968), создание цифровых почвенных карт на основе выбранной модели и оценку полученных карт. Работы велись в программе R-Studio.

Суть проверки заключалась в следующем: всю выборку точек (100 %) программа случайным образом делит на выборки в соотношении 70 % и 30 %, при этом по первой производится построение модели (карты), а по второй эта карта проверяется, т. е. анализируется количество правильного определения точек второй выборки к исходным классам по карте, построенной по первой выборке. Если все эти точки определены верно, то значение согласованности равно 1, если неверно – 0.

Сравнивались алгоритмы: *Random Forest* (RF, случайный лес), *Multinomial logistic regression* (MLR, полиномиальная логистическая регрессия), *Linear discriminant analysis* (LDA, линейный дискриминантный анализ). По литературным данным (Jeune, 2018; Meier, 2018; Stum et al., 2010), алгоритм RF широко используется при создании цифровых почвенных карт и часто оказывается предпочтительным. Алгоритм MLR также используется при создании цифровых почвенных карт (Kempen et al., 2009; Abdel-Kader., 2011; Piccini et al., 2018; Abbaszadeh Afshar et al., 2018). Алгоритм LDA применяют для классификации объектов, однако для построения карт он обычно не используется из-за важного

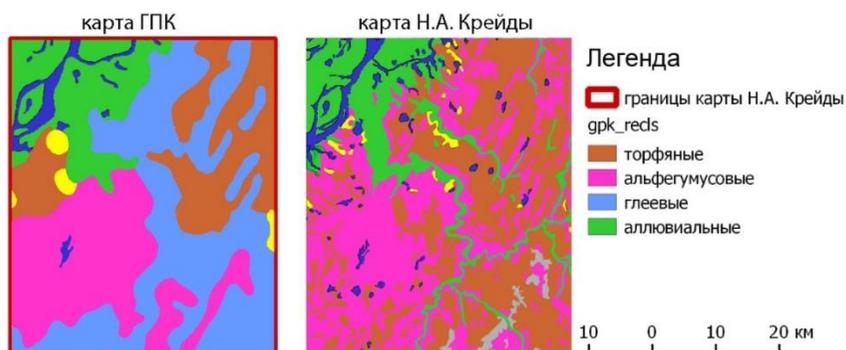
ограничения – все предикторы должны быть количественными и подчиняться многомерному нормальному распределению.

Для каждого из вышеназванных алгоритмов в 10-кратных проворностях, т. е. 10 раз создавалась разная выборка точек для построения модели и ее проверки, отдельно для мелкомасштабной и среднемасштабной карты рассчитывался индекс каппа. Далее рассчитывалось среднее значение каппы для каждого алгоритма и карты. В основу этих моделей закладывались ранее выбранные ковариаты, описанные выше.

*Этап независимой проверки полученных цифровых и оцифрованных исходных карт* заключался в их сравнении с общей ландшафтной ситуацией, отражаемой на снимках, и полевыми данными, полученными в результате экспедиций, которые проходили на этой территории в августе с 2014 г. по 2016 г. Верификация мелкомасштабных карт велась по 67 разрезам, верификация среднемасштабных карт – по 44 разрезам.

В первом приближении все описанные в поле почвы отнесены к четырем группам: П – альфегумусовые (подзолы и подбуры), Т – торфяные, А – аллювиальные, Г – глеевые (и криометаморфические). С ними же были соотнесены наименования преобладающих почв в контурах, выделенных на базовых почвенных картах (ГПК и карте [Н.А. Крейды](#)). На карте Н.А. Крейды, помимо вышеназванных групп, была выделена группа т.-д. – текстурно-дифференцированные (подзолистые) почвы. Полевые данные по ним отсутствуют, т. к. область их широкого распространения находится значительно южнее районов полевых исследований в 2014, 2015 и 2016 гг.

На рисунке 2 изображена оцифрованная и объединенная по группам почв почвенная карта Н.А. Крейды и фрагмент ГПК на одну и ту же территорию. В легенде даны все группы, присутствующие на обеих картах, поэтому в ней нет подзолистых почв, которые отмечены серым цветом на среднемасштабной карте.



**Рис. 2.** Группы почв, выделенные по отцифрованной ГПК и отцифрованной карте Н.А. Крейды границах полигона.

**Fig. 2.** Groups of soils shown on the digitized State Soil Map and on the digitized map by N.A. Kreida within the boundaries of the polygon.

На водные объекты и массивы развееваемых и слабозакрепленных песков с псамоземами была отдельно создана маска – эти объекты маскировались при моделировании, а затем включались в итоговые цифровые карты.

*Коррекция закладываемой модели.* Результаты визуальной проверки изначальных и полученных в результате моделирования почвенных контуров по аэроснимкам Bing, доступным через программу QGIS, и их соотнесения с полевыми данными показали необходимость предварительной ручной корректировки закладываемой картографической модели – почвенной карты Н.А. Крейды. Такая коррекция была проведена (см. ниже).

После коррекции исходной карты Н.А. Крейды вновь проводился подбор алгоритма создания цифровой карты, ее построение и независимая проверка по полевым данным.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как для мелкомасштабной, так и для среднемасштабной карты лучшие результаты “самопроверки” (по индексу каппа) были получены при использовании алгоритма RF (табл. 1). Похожие результаты для этого алгоритма отмечены и другими авторами при создании почвенных карт на другие территории ([Jeune et al., 2018](#); [Pahlavan-Rad et al., 2016](#)).

**Таблица 1.** Критерий каппа для разных алгоритмов построения мелкомасштабной карты

**Table 1.** Кappa index of agreement for different algorithms of small-scale digital soil mapping

Алгоритм	№ повторности										Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
RF	0.39	0.38	0.40	0.39	0.38	0.39	0.39	0.40	0.39	0.38	<b>0.39</b>
LDA	0.27	0.27	0.28	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	<b>0.28</b>
MLR	0.32	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31	0.31	0.31	0.32	0.31	<b>0.31</b>

Среднее значение каппа для *мелкомасштабной карты* по 10 повторностям для метода RF оказалось равным 0.39 (табл. 1), что соответствует удовлетворительному уровню совпадения (0.21–0.40), согласно Landis ([Landis, Koch, 1977](#)), но ближе к верхней границе градации.

Итоговая мелкомасштабная цифровая почвенная карта, построенная по алгоритму RF, представлена на рисунке 3.

Для *среднемасштабной карты* среднее значение каппа по 10 повторностям при использовании алгоритма RF оказалось равным 0.36 (табл. 2), что также соответствует удовлетворительному уровню совпадения (0.21–0.40) согласно ([Landis, Koch, 1977](#)).

**Таблица 2.** Критерий каппа для разных алгоритмов построения среднемасштабной карты

**Table 2.** The Kappa coefficient of agreement for different algorithms of medium-scale digital soil mapping

Алгоритм	№ повторности										Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
RF	0.38	0.37	0.35	0.38	0.36	0.37	0.35	0.36	0.35	0.38	<b>0.36</b>
LDA	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.21	<b>0.18</b>
MLR	0.31	0.30	0.31	0.29	0.31	0.29	0.31	0.33	0.32	0.31	<b>0.31</b>

Алгоритм RF использовался и для построения *среднемасштабной цифровой почвенной карты* на западную часть полигона (рис. 4).



Легенда

- 1** Тундровые иллювиально-гумусовые оподзоленные и тундровые иллювиально-гумусовые оподзоленные сухоторфянистые
- 2** Тундровые поверхностно-глеевые дифференцированные, тундровые поверхностно-глеевые дифференцированные сухоторфянистые и тундровые поверхностно-глеевые пятен мерзлотные
- 3** Тундровые остаточно-торфяные мерзлотные и болотные верховые мерзлотные
- 4** Болотно-тундровые торфянисто-глеевые иллювиально-гумусовые и болотно-тундровые иллювиально-гумусовые сухоторфянисто-глеевые мерзлотные с болотно-тундровыми торфяно-глеевыми иллювиально-гумусовыми и болотно-тундровыми иллювиально-гумусовыми сухоторфяно-глеевыми мерзлотными
- 5** Аллювиальные болотные и аллювиальные дерновые глеевые
- 6** Болотно-тундровые торфянисто-глеевые и болотно-тундровые сухоторфянисто-глеевые мерзлотные с болотно-тундровыми торфяно-глеевыми и болотно-тундровыми сухоторфяно-глеевыми мерзлотными
- 7** Болотно-тундровые оподзоленные торфянисто-глеевые и болотно-тундровые оподзоленные сухоторфянисто-глеевые мерзлотные с болотно-тундровыми оподзоленными торфяно-глеевыми и болотно-тундровыми оподзоленными сухоторфяно-глеевыми мерзлотными
- 8** Болотные верховые мерзлотные и тундровые остаточно-торфяные мерзлотные
- 9** Подзолы иллювиально-гумусовые
- 10** Подзолы иллювиально-гумусовые и подзолы иллювиально-гумусовые сухоторфянистые

**Рис. 3.** Мелкомасштабные почвенные карты: слева – исходная (оцифрованная Государственная почвенная карта), справа – цифровая.

**Fig. 3.** Small-scale soil maps: initial digitized State Soil Map (on the left) and the new developed digital soil map (on the right).



Матрицы неточностей исходной и цифровой *мелкомасштабной* карты с полевыми данными представлены ниже (слева и справа, соответственно). Для этой карты рассмотрены 4 основных группы почв: П – альфегумусовые (подзолы и подбуры), Т – торфяные, А – аллювиальные, Г – глеевые/криометаморфизованные (на суглинках).

Точность исходной карты, проверяемой по полевым данным, оказалась крайне низкой, что связано с масштабом карты и с тем, что в состав ее контуров входит сразу несколько (до трех) почвенных комплексов, реже почв. При проверке точности карты учитывалась только первая (преобладающая) почва (или комплекс почв). Несоизмеримость масштаба карты (1 : 1 млн) и точечных полевых данных, характеризующих площади порядка 1–5 м<sup>2</sup>, не позволяет судить на ее основе о “несовпадении” исходной карты и полевых данных.

		Полевые данные			
		П	Т	А	Г
данные с карты	П	2			
	Т	12	2		6
	А			2	
	Г	22	10	1	10

Общая точность: 16 : 67 = 24 %

		Полевые данные			
		П	Т	А	Г
данные с карты	П	8			
	Т	7	2		6
	А	5	4	2	4
	Г	16	6	1	6

Общая точность: 18 : 67 = 26 %

Все это справедливо и для новой цифровой карты, построенной с помощью ДДЗ, разрешение которой меньше размеров площадок полевых описаний, что в условиях неоднородности и комплексности почвенного покрова и недостаточной точности привязки полевых данных (по данным однократных определений координат приемником GPS) делает оценку точности карты по полевым данным весьма условной. Количество точек для проверки явно недостаточное, чтобы оценить точность вновь созданной карты (67 разрезов на площади 4638 км<sup>2</sup>). Проверку на точность мелкомасштабной карты с комплексным почвенным покровом стоит

рассматривать не столько как сравнение исходной и цифровой карты, сколько как материалы для разработки более обоснованного подхода к проверке цифровых карт и дальнейшего обсуждения этой темы.

Тем не менее стоит отметить, что точности исходной оцифрованной мелкомасштабной карты и цифровой мелкомасштабной карты оказались близки. Условно можно говорить о том, что новая цифровая карта оказалась “не хуже” исходного оригинала.

Общие точности исходной (слева) и цифровой (справа) *среднемасштабной карты* при проверке по полевым данным оказались выше, чем для мелкомасштабной карты.

Полевые данные					
данные с карты		П	Т	А	Г
	П	17	2		1
	Т	9	5	1	2
	А	2		2	1
	Т-д				

Общая точность:  $24 : 44 = 54 \%$

Полевые данные					
данные с карты		П	Т	А	Г
	П	14	0	1	1
	Т	7	3		
	А	2		2	1
	Т-д	7	4		2

Общая точность:  $19 : 44 = 43 \%$

В карте Н.А. Крейды кроме вышеназванных групп почв присутствуют еще группа текстурно-дифференцированных (подзолистых) почв (т.-д.).

Более высокое соответствие среднемасштабных карт полевым данным связано с выделением на карте менее крупных контуров с более однородным почвенным покровом (в контурах, как правило, показана только одна почва); сама территория этой (западной) части тестового полигона более однородна и целиком входит в состав одного почвенного района ([Забоева и др., 1984](#)). Проверка среднемасштабных карт по полевым данным представляется более корректной. Следует отметить, что точность (степень совпадения с полевыми данными) у исходной карты оказалась выше, чем у новой цифровой карты: первой соответствовало 24

описания (из 44), причем еще два описания попали на водные объекты по карте; совпадение с новой цифровой картой – у 19 описаний из 44. Ряд описаний, причем разных групп почв, “попали” в контуры с т.-д. почвами.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что описанный подход к созданию цифровых почвенных карт среднего и мелкого масштаба вполне оправдан. Однако в данном случае говорить о достоверной проверке карт по полевым данным или о более точном отображении реальной ситуации на цифровых картах преждевременно. Их визуальный анализ показывает неплохое совпадение с общим рисунком снимков, однако есть “проблемные” участки, где такого совпадения не наблюдалось. Для них возможна ручная корректировка, или на уже готовой цифровой карте, или на исходной карте. Последний путь и опробован в нашей работе.

*Коррекция исходной карты и построение новой цифровой карты* были проведены для *среднемасштабной карты*. Коррекция заключалась в небольшой ручной правке границ некоторых контуров и в уточнении смыслового содержания легенды карты.

Так, показанные на ней небольшие контуры пойменных перегнойно-болотных почв попали на существенно разные объекты по снимкам: собственно поймы, лесные массивы (террас), развеваемые пески, водные объекты. Учитывая малые площади таких почв, было решено отказаться от самостоятельного отображения их контуров, присоединив их к соседним почвам, занимающим большие площади.

Также была произведена корректировка болотных массивов с торфяными почвами. Они были разделены на две группы: болота с преобладанием обводненных мочажин и болота с преобладанием бугров. Для первых характерны торфяные эутрофные почвы, для вторых – мерзлотные торфяные олиготрофные почвы. Они хорошо разделяются по снимкам, так как растительный покров этих почв имеет отличающиеся спектральные характеристики. Для обводненных мочажин характерны осоково-пушицево-сфагновые сообщества; для бугров – багульниковые морошкovo-кустарничково-лишайниково-моховые сообщества. Выделение же олиготрофных и эутрофных почв напрямую зависит от состава

торфа, который тесно связан с растительным покровом. Ряд выделенных на картах контуров (или частей контуров) болот по снимкам явно попадал на другие объекты. В этом случае проводилась ручная корректировка их границ, а выделенные в откорректированных местах торфяные почвы переименовывались с учетом близости расположения соседних контуров почв с другими почвами.

Для построения новой карты были взяты те же ковариаты, что и ранее. Итогом проведения такой коррекции стало то, что при построении модели точность разных алгоритмов возросла (табл. 3).

**Таблица 3.** Критерий каппа для разных алгоритмов построения среднемасштабной карты после ручной коррекции исходной карты  
**Table 3.** The Kappa coefficient of agreement for different algorithms of medium-scale digital mapping after manual correction of the initial map

Алгоритм	№ повторности										Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
RF	0.40	0.38	0.39	0.40	0.40	0.38	0.38	0.39	0.41	0.39	<b>0.39</b>
LDA	0.31	0.28	0.32	0.31	0.29	0.30	0.29	0.31	0.30	0.30	<b>0.30</b>
MLR	0.36	0.34	0.36	0.37	0.37	0.35	0.35	0.35	0.35	0.36	<b>0.35</b>

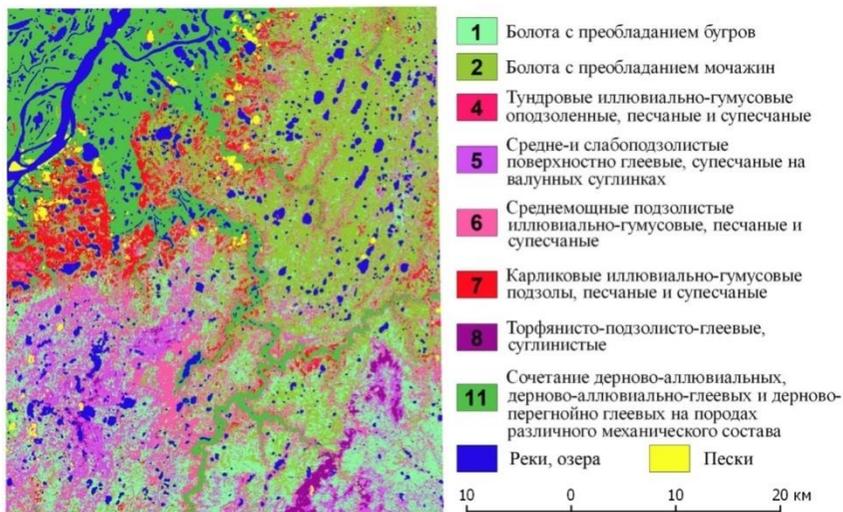
Так же, как и при сравнении каппа для построения картографической модели по не откорректированным средне и мелко-масштабным почвенным картам, наилучший результат был получен для алгоритма RF, который и был использован при построении нового варианта среднемасштабной цифровой почвенной карты (рис. 5).

Как видно из приведенной ниже матрицы неточностей, оценка точности этой карты по полевым данным существенно возросла – с 43 до 61 %.

Для мелкомасштабных карт, отражающих сложный почвенный покров с преобладающей и сопутствующими почвами (часто показываемыми внесмасштабными знаками), при известном примерном соотношении между ними, возможен иной метод коррекции – с включением этапа дезагрегации карты, например, с помощью алгоритма DSMART ([Nathan et al., 2014](#)).

Полевые данные					
данные с карты		П	Т	А	Г
	П	21		1	2
	Т	1	4		1
	А	2		2	1
	Т-Д	6	1		

Общая точность:  $27 : 44 = 61 \%$



**Рис. 5.** Итоговая обновленная среднemasштабная карта (по скорректированной начальной карте).

**Fig. 5.** Medium-scale digital soil map obtained after manual correction of the initial map.

В случае Государственной почвенной карты необходимо экспертное заключение о “весе” той или иной почвы в контурах. Для разделения самих почвенных комплексов необходимы снимки, разрешение которых было бы сопоставимо по размеру с эле-

ментарными почвенными ареалами для исследуемой территории. При отсутствии эксперта метод, используемый в настоящей работе, представляется наиболее рациональным: он не требует большого объема данных, экспертного знания территории (“экспертом” выступает изначальная карта), а все используемые материалы – открытого доступа. Метод применим в разных природных зонах, однако для каждой новой территории необходим свой набор предикторов и исходных данных, наиболее значимых для исследуемого участка.

Предварительная коррекция контурной и смысловой части исходных карт позволяет существенно повысить точность построения новой цифровой модели почвенного покрова.

## ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены этапы построения и проверки создаваемых цифровых почвенных карт среднего и мелкого масштаба. Также рассмотрено влияние закладываемой модели на результат картографирования на примере среднемасштабной карты.

1) На этапе построения карты, среди опробованных методов моделирования: Random Forest (RF), Multinomial logistic regression (MLR), Linear discriminant analysis (LDA), – наибольшую точность предсказания показал метод случайного леса (Random Forest). Среднее значение индекса каппа для цифровой мелкомасштабной и предварительно откорректированной среднемасштабной карты составило 0.39, что соответствует удовлетворительному уровню совпадения (0.21–0.40), согласно Landis ([Landis, Koch, 1977](#)), но ближе к верхней границе градации.

2) Для ориентировочной проверки построенных картографических моделей были использованы группы почв, близкие по своему содержанию к отделам Классификации почв России 2004 г. Повышение определяемого таксономического уровня почв в целом негативно сказывается на достоверности проверяемой модели, однако, с методической точки зрения, проверка полученных карт с приведением их и полевых данных к единому языку оправдана.

3) Проверка по независимым полевым данным показала, что общая точность исходных карт и новых цифровых карт сходна: для мелкомасштабной карты – 24 и 26 %; для среднемасштабной

карты – 54 и 43 % соответственно. Предварительная коррекция исходной среднемасштабной карты позволила увеличить точность цифровой модели до 61 %. Такая коррекция возможна в ручном и автоматическом режимах для объектов, хорошо диагностируемых на снимке. В нашем случае это были водные объекты и массивы развеваемых песков. Создаваемая маска таких объектов в дальнейших процедурах статистического анализа выбранных ковариат не участвует и напрямую входит в создаваемую цифровую карту.

Следует отметить, что проверка средне- и особенно мелко-масштабных карт для территорий со сложным комплексным почвенным покровом по немногочисленным точечным полевым данным не может считаться полностью корректной. Скорее, ее следует рассматривать как предварительную оценку карт.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ “Крупномасштабное цифровое картографирование почв на основе дистанционного зондирования” (проект 15-16-30007). Автор благодарит сотрудников Почвенного института имени В.В. Докучаева С.Ф. Хохлова и Д.Е. Коношкова за содействие в проведении исследований и написании статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Векшина В.Н.* Поиск и верификация предикторов почвообразования в лесотундровой зоне по дистанционным данным // Сборник кратких тезисов III Молодежной конференции “Почвоведение: Горизонты Будущего 2019”: сб. тр. науч. конф. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2019. [в печати]
2. ВСЕГЕИ (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского). URL: <http://www.vsegei.ru>.
3. Государственная почвенная карта СССР. Лист Q-39 (Нарьян-Мар). Гл. ред. Герасимов И.П., Егоров В.В., Иванова Е.Н., Розов Н.Н. ГУГК, фабрика № 4. 1977. 1 л.
4. Государственная почвенная карта СССР. М: 1 : 1 млн. Лист Q-40 (Печора) / Гл. ред. Герасимов И.П., Егоров В.В., Иванова Е.Н., Розов Н.Н., Фридланд В.М. ГУГК, фабрика № 10. 1982. 1 л.
5. *Докучаев П.М.* Построение цифровой почвенной карты и картограммы углерода с использованием методов цифрового почвенного

картографирования (на примере Вятско-Камской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13. М., 2017. 25 с.

6. *Жоголев А.В.* Актуализация региональных почвенных карт на основе спутниковых и геоинформационных технологий (на примере Московской области): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 03.02.13. М., 2016. 22 с.

7. *Забоева И.В., Игнатенко И.В., Казаков В.Г., Попов В.А., Рубцов М.Д., Руднева Е.Н.* Государственная почвенная карта СССР Объяснительная записка к листу “Нарьян-Мар” Q-39. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева. 1984. 62 с.

8. *Каверин Д.А., Шахтарова О.В., Пастухов А.В., Мажитова Г.Г., Лантева 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.

9. *Конюшкова М.В., Козлов Д.Н.* Автоматизированный анализ распространения тёмноцветных черноземовидных почв в северном Прикаспии по данным космической съемки (на примере Джаныбекского стационара) // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 5. С. 46–56.

10. *Лавриненко И. А.* Геоботаническое районирование Большеземельской тундры и прилегающих территорий. Геоботаническое картографирование. СПб. Из-во: РАН Ботанический институт им. В.Л. Комарова. 2013. С. 74–92.

11. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Вып. 1. Архангельская и Вологодская области, Коми АССР. Книга 1. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 483 с.

12. *Осадчая Г.Г., Тумель Н.В.* Локальные ландшафты как индикаторы геокриологической зональности (на примере Европейского северо-востока) // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 3. С. 62–71.

13. Почвенная карта масштаба 1 : 200 000. Лист Q-39-V, VI (Нарьян-Мар) / Крейда Н.А. М., 1958. 1 л.

14. *Савин И.Ю.* Использование спутниковых данных для составления почвенных карт: современные тенденции и проблемы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 29–39.

15. *Савин И.Ю., Овечкин С.В.* Об обновлении Среднемасштабных почвенных карт // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1184–1192.

16. *Савин И.Ю., Симакова М.С.* Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 104–115.

17. *Сухачева Е.Ю., Апарин Б.Ф., Андреева Т.А., Казаков Э.Э., Лазарева М.А.* Принципы и методы создания цифровой среднemasштабной почвенной карты Ленинградской области // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64. № 1. С. 100–113.
18. *Abbaszadeh Afshar F., Ayoubi S., Jafari A.* The extrapolation of soil great groups using multinomial logistic regression at regional scale in arid regions of Iran // *Geoderma*. 2018. Vol. 315. P. 36–48.
19. *Abdel-Kader F.* Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: A multinomial logistic regression approach // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2011. Vol. 14. P. 29–40. DOI: [10.1016/j.ejrs.2011.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2011.04.001).
20. *Arrouays D., McKenzie N., Hempel J., de Forges A.R., McBratney A.* (Eds.). *GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Information System*. CRC Press. Balkema, 2014. 494 p.
21. ASTER GDEM v. 2. <http://viewfinderpanoramas.org/dem1d.html>.
22. *Cohen J.* A coefficient of agreement for nominal scales // *Educ. Psychol. Measurement*. 1960. Vol. 20. P. 37–46.
23. *Cohen J.* Weighted kappa: Nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit // *Psychol. Bull.* 1968. Vol. 70. P. 213–220.
24. *Dharumarajan S., Hegde R., Singh S.K.* Spatial prediction of major soil properties using random forest techniques – a case study in semi-arid tropics of South India // *Geoderma Reg.*, 2017. Vol. 10. P. 154–162.
25. *Grimm R., Behrens T., Märker M., Elsenbeer H.* Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—digital soil mapping using random forests analysis // *Geoderma*. 2008. Vol. 146. P. 102–113.
26. *Jeune W., Francelino M.R., Eliana de Souza, Elpídio Inácio Fernandes Filho, Rocha G.C.* Multinomial Logistic Regression and Random Forest Classifiers in Digital Mapping of Soil Classes in Western Haiti // *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2018. Vol. 42. P. 1–20.
27. *Kempen B., Brus D.J., Heuvelink G.B.M., Stoorvogel J.J.* Updating the 1 : 50 000 Dutch soil map using legacy soil data: a multinomial logistic regression approach // *Geoderma*. 2009. Vol. 151. P. 311–326.
28. *Landis J.R., Koch G.G.* The measurement of observer agreement for categorical data // *Biometrics*. 1977. Vol. 33, No. 1. P. 159–174. DOI: [10.2307/2529310](https://doi.org/10.2307/2529310).
29. *Meier M., de Souza E., Francelino, M.R.* Digital Soil Mapping Using Machine Learning Algorithms in a Tropical Mountainous Area // *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2018. Vol. 42. P. 1–22.
30. *McBratney A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B.* On Digital Soil Mapping // *Geoderma*. 2003. Vol. 117. P. 3–52.

31. *Nathan P., Odgers N.P., Wei Sun McBratney A.B., Minasny B., Clifford D.* Disaggregating and harmonising soil map units through resampled classification trees // *Geoderma*. 2014. Vol. 214–215. P. 91–100. DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.09.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.024).
32. *Pahlavan-Rad M.R., Khormali F., Toomanian N., Brungard C. W., Kiani F., Komaki C.B., Bogaert P.* Legacy soil maps as a covariate in digital soil mapping: A case study from Northern Iran // *Geoderma*. 2016. Vol. 279. P. 141–148.
33. *Piccini C., Marchetti A., Napoli R., Riviaccio R.* Multinomial logistic regression with soil diagnostic features and land surface parameters for soil mapping of Latium (Central Italy) // *Geoderma*. 2018. Vol. 352. P. 385–394. DOI: [10.1016/j.geoderma.2018.09.037](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.037).
34. *Stum A.K., Boettinger M.A., White R.D., Ramsey R.D.* Random Forests Applied as a Soil Spatial Predictive Model in Arid Utah // *Digital Soil Mapping*. Springer. Dordrecht, The Netherlands, 2010. P. 179–190.
35. *Vågen T.G., L.A. Winowiecki L.A., Tondoh J.E., Desta L.T., Gumbricht T.* Mapping of soil properties and land degradation risk in Africa using MODIS reflectance // *Geoderma*. 2016. Vol. 263. P. 216–225.

## REFERENCES

1. Vekshina V.N., Poisk i verifikatsiya prediktorov pochvoobrazovaniya v lesotundrovoy zone po distantsionnyim dannym (Search for and verification of soil predictors in the forest-tundra zone on the basis of remote sensing data), Collection of short abstracts of the *III Youth Conference Pochvovedenie: Gorizontyi Buduschego 2019* (Proc. Youth Conf. Soil Science: Horizons of the Future 2019), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2019 [in print].
2. VSEGEI, Vserossiiskiy nauchno-issledovatel'skiy geologicheskii institut im. A.P Karpinskogo (All-Russian State Research Institute named after Karpinsky), URL: <http://www.vsegei>.
3. Gerasimov I.P., Egorov V.V., Ivanova E.N., Rozov N.N. (Eds.), *USSR State Soil Map*, scale 1 : 1 M, Sheet Q-39, Nar'yan-Mar, GUGK, factory No. 4, 1977.
4. Gerasimov I.P., Egorov V.V., Ivanova E.N., Rozov N.N. (Eds.), *USSR State Soil Map*, scale 1 : 1 M, Sheet Q-40, Pechora, GUGK, factory No. 10, 1982.
5. Dokuchayev P.M., *Postroyeniye tsifrovoy pochvennoy karty i kartogrammy ugleroda s ispolzovaniyem metodov tsifrovogo pochvennogo kartografirovaniya (na primere Vyatsko-Kamskoy provintsii dernovo-podzolistykh pochv yuzhnoy taygi): Diss. ... kand. biol. nauk* (Construction of

a digital soil map and carbon map using digital soil mapping methods (by the example of the Vyatka-Kama province of sod-podzolic soils of the southern taiga), Cand. boil. sci. thesis), Moscow: MSU, 2017, 206 p.

6. Zhogolev A.V., *Aktualizatsiya regionalnykh pochvennykh kart na osnove sputnikovykh i geoinformatsionnykh tekhnologiy (na primere Moskovskoy oblasti): Diss. ... kand agric. nauk* (Updating regional soil maps based on satellite and geographic information technologies (by the example of Moscow region), Cand. agric. sci. thesis), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2016, 203 p.

7. Zaboeva I.V., Ignatenko I.V., Kazakov V.G., Popov V.A., Rubtsov M.D., Rudneva E.N., *USSR State Soil Map, Ob'yasnitel'naya zapiska k listu "Nar'yan-Mar" Q -39* (explanatory note to the sheet "Nar'yan-Mar" Q -39), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1984, 62 p.

8. Kaverin D.A., Shakhtarova O.V., Pastukhov A.V., Mazhitova G.G., Lapteva E.M., *Sostavleniye krupnomasshtabnykh pochvennykh kart klyuchevykh uchastkov v tundre i lesotundre severo-vostoka Evropeyskoy Rossii* (The large-scale soil maps mapping for key areas in the tundra and forest-tundra of the north-east of European Russia), *Geography and Natural Resources*, 2012, No. 3, pp.140–146.

9. Konyushkova M.V., Kozlov D.N., *Avtomatizirovanny analiz rasprostraneniya temnotsvetnykh chernozemovidnykh pochv v severnom Prikaspii po dannym kosmicheskoy syemki (na primere Dzhanybekskogo stacionara)* (Automated analysis of the distribution of dark-colored chernozem-like soils in the northern Caspian region according to satellite imagery (by the example of the Dzhanybek station)), *Arid ecosystems*, 2010, Vol. 16, No. 5, pp. 46–56.

10. Lavrinenko I.A., *Geobotanicheskoe rajonirovanie Bol'shezemel'skoy tundry i privileyushchih territoriy. Geobotanicheskoe kartografirovanie* (Geobotanical mapping), St. Petersburg: Iz-vo RAS Botanical Institute named after V.L. Komarov, 2013, pp. 74–92.

11. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR* (Scientific reference book on climatology of the USSR), Ser. 3, Iss. 1, Arkhangelsk and Volgograd region, Komi ASSR, 1989, Book 1, Leningrad: Gidrometeoizdat, 485 p.

12. Osadchaya G.G., Tumel'N.V., *Lokal'nye landshafty kak indikatory geokriologicheskoy zonal'nosti (na primere Evropeyskogo severo-vostoka)* (Local landscapes as indicators of permafrost zonality (by the example of the European Northeast)), *Earth Cryosphere*, 2012, Vol. XVI, No. 3, pp. 62–71.

13. Kreida N.A., *Soil map, scale 1 : 200,000, Sheet Q-39-V, VI Nar'yan-Mar*, Moscow, 1958.

14. Savin I.Yu., *Ispolzovaniye sputnikovykh dannyykh dlya sostavleniya pochvennykh kart: sovremennyye tendentsii i problemy* (Using satellite data

for soil mapping: current trends and challenges), *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 29–39.

15. Savin I.Yu., Ovechkin S.V., Ob obnovlenii Srednemashtabnykh pochvennykh kart (About Upgrading Medium scale Soil Maps), *Pochvovedeniye*, 2014, No. 10, pp. 1184–1192.

16. Savin I.Yu., Simakova M.S., Sputnikovyye tekhnologii dlya inventarizatsii i monitoringa pochv v Rossii (Satellite technologies for soil inventory and monitoring in Russia), *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 104–115.

17. Sukhacheva E.Yu., Aparin B.F., Andreyeva T.A., Kazakov E.E., Lazareva M.A., Printsipy i metody sozdaniya tsifrovoy srednemashtabnoy pochvennoy karty Leningradskoy oblasti (Principles and methods for creating a digital medium-scale soil map of the Leningrad Region), *Bulletin of St. Petersburg State University, Earth sciences*, 2019, Vol. 64, No. 1, pp. 100–113.

18. Abbaszadeh Afshar F., Ayoubi S., Jafari A., The extrapolation of soil great groups using multinomial logistic regression at regional scale in arid regions of Iran, *Geoderma*, 2018, Vol. 315, pp. 36–48.

19. Abdel-Kader F., Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: A multinomial logistic regression approach, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2011, Vol. 14, pp. 29–40, DOI: [10.1016/j.ejrs.2011.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2011.04.001).

20. Arrouays D., McKenzie N., Hempel J., de Forges A.R., McBratney A. (Eds.), *GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Information System*, CRC Press, Balkema, 2014, 494 p.

21. ASTERGDEMv. 2. URL: <http://viewerpanoramas.org/dem1d.html>.

22. Cohen J., A coefficient of agreement for nominal scales, *Educ. Psychol. Measurement*, 1960, Vol. 20, pp. 37–46.

23. Cohen J., Weighted kappa: Nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit, *Psychol. Bull.*, 1968, Vol. 70, pp. 213–220.

24. Dharumarajan S., Hegde R., Singh S.K., Spatial prediction of major soil properties using random forest techniques – a case study in semi-arid tropics of South India, *Geoderma Reg.*, 2017, Vol. 10, pp. 154–162.

25. Grimm R., Behrens T., Märker M., Elsenbeer H., Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—digital soil mapping using random forests analysis, *Geoderma*, 2008, Vol. 146, pp. 102–113.

26. Jeune W., Francelino M.R., Eliana de Souza, Elpidio Inácio Fernandes Filho, Rocha G.C., Multinomial logistic regression and random forest classifiers in digital mapping of soil classes in western Haiti, *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 2018, Vol. 42, pp. 1–20.

27. Kempen B., Brus D.J., Heuvelink G.B.M., Stoorvogel J.J., Updating the 1:50,000 Dutch soil map using legacy soil data: a multinomial logistic regression approach, *Geoderma*, 2009, Vol. 151, pp. 311–326.
28. Landis J.R., Koch G.G., The measurement of observer agreement for categorical data, *Biometrics*, 1977, Vol. 33, No. 1, pp. 159–174, DOI: [10.2307/2529310](https://doi.org/10.2307/2529310).
29. Meier M., de Souza E., Francelino M.R., Digital Soil Mapping Using Machine Learning Algorithms in a Tropical Mountainous Area, *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 2018, Vol. 42, pp. 1–22.
30. McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B., On Digital Soil Mapping, *Geoderma*, 2003, Vol. 117, pp. 3–52.
31. Nathan P., Odgers N.P., Wei Sun, McBratney A.B., Minasny B., Clifford D., Disaggregating and harmonising soil map units through resampled classification trees, *Geoderma*, 2014, Vol. 214–215, pp. 91–100, DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.09.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.024).
32. Pahlavan-Rad M.R., Khormali F., Toomanian N., Brungard C. W., Kiani F., Komaki C.B., Bogaert P., Legacy soil maps as a covariate in digital soil mapping: A case study from Northern Iran, *Geoderma*, 2016, Vol. 279, pp. 141–148.
33. Piccini C., Marchetti A., Napoli R., Riviaccio R., Multinomial logistic regression with soil diagnostic features and land surface parameters for soil mapping of Latium (Central Italy), *Geoderma*, 2018, Vol. 352, pp. 385–394, DOI: [10.1016/j.geoderma.2018.09.037](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.037).
34. Stum A.K., Boettinger M.A., White R.D., Ramsey R.D., Random Forests Applied as a Soil Spatial Predictive Model in Arid Utah, *Digital Soil Mapping*, Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2010, pp 179–190.
35. Vågen T.G., Winowiecki L.A., Tondoh J.E., Desta L.T., Gumbricht T., Mapping of soil properties and land degradation risk in Africa using MODIS reflectance, *Geoderma*, 2016, Vol. 263, pp. 216–225.