

## ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.47

### СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ И ПРОБЛЕМЫ ПОЧВЕННОЙ КАРТОГРАФИИ

© 2019 г. И. Ю. Савин<sup>1, 2, \*</sup>, А. В. Жоголев<sup>1</sup>, Е. Ю. Прудникова<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2

<sup>2</sup>Белгородский государственный университет, Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85

<sup>3</sup>Аграрно-технологический институт РУДН, Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

\*e-mail: savin\_iyu@esoil.ru

Поступила в редакцию 23.04.2018 г.

После доработки 28.05.2018 г.

Принята к публикации 28.11.2018 г.

Рассмотрены тенденции развития методов картографирования почв и выделены основные проблемы. В настоящий момент уже закончен переход от создания бумажных почвенных карт к цифровым почвенно-географическим базам данных. В качестве основного метода на всех уровнях обобщения выступает цифровое картографирование почв и их свойств. Подходы цифровой почвенной картографии, как и традиционная почвенная картография, базируются на идеях В.В. Докучаева о связи почв с факторами почвообразования, но в процессе картографирования задействуются новые достижения математической статистики и математического моделирования. Этим достигается большая объективность и воспроизводимость создаваемых цифровых карт по сравнению с традиционными. При этом сохраняются все нерешенные проблемы почвенной картографии, связанные с недостатком полевых данных, масштабом, классификацией почв, отражением пространственных микронеоднородностей, картографированием отдельных свойств почв. Частично эти проблемы могут быть решены на основе данных дистанционного зондирования. При использовании почвенно-географической информации для оценки качества почвенных ресурсов применение дистанционных методов выглядит более предпочтительным по сравнению с методами цифровой почвенной картографии.

**Ключевые слова:** цифровое картографирование почв, данные дистанционного зондирования, ГИС, почвенная карта

**DOI:** 10.1134/S0032180X19050101

#### ВВЕДЕНИЕ

Решение прикладных задач в подавляющем большинстве случаев требует наличия пространственной информации о почвах. Почвенная карта является интерфейсом между теоретическим и прикладным почвоведением. С одной стороны, почвенная карта аккумулирует знания почвоведов-картографов о географии почв региона, а с другой она является основой для решения многих практических задач, связанных как с оценкой почвенных и земельных ресурсов в сельском хозяйстве, так и для моделирования и оценки рисков в экологии и природопользовании. Теоретическое и прикладное значение почвенных карт отмечается еще со времен становления почвоведения как науки. Почвенная карта является основным результатом почвенно-географических исследований, поэтому вопросам разработки оптимальных методов картографирования почв всегда уделялось повышенное внимание.

Традиционное составление почвенных карт, основы которого были заложены еще в работах

В.В. Докучаева, со временем постепенно эволюционировали, особенно с появлением данных дистанционного зондирования, а в последние десятилетия с внедрением методов математического и геостатистического моделирования. При этом многие недостатки традиционных подходов сохранились до настоящего времени, но, кроме них, появились и дополнительные проблемы. Поэтому обсуждение современного состояния почвенной картографии и возможных путей ее развития на ближайшее будущее является в настоящее время как никогда актуальным. Этому посвящена предлагаемая статья.

#### ТРАДИЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОЧВ

Проблема правильного научного (не статистического) картографирования почв возникла с момента зарождения почвоведения как науки. Еще в начале XX в. Г.Ф. Нефедов предлагал картографировать почвы в виде отдельных слоев их

свойств, опираясь на регулярную или нерегулярную сетку точек полевого обследования [16] (назовем это направление условно “точечное”). Но в результате научных дискуссий приоритетное развитие получило направление школы В.В. Докучаева, базирующееся на подходах “факторного” картографирования почв. Суть этого направления заключается в поисках экологической ниши конкретной почвы и в идее о том, что при определенном сочетании факторов почвообразования может сформироваться лишь определенная почва [3]. Подход В.В. Докучаева кроме всех его преимуществ был гораздо менее затратным и трудоемким. На его основе можно было создавать почвенные карты даже мелкого масштаба, что сделать в рамках точечного направления Г.Ф. Нефедова было невозможно.

Именно этот, факторный, подход и был положен в основу традиционных отечественных, а затем и зарубежных методов картографирования почв, и подавляющее большинство почвенных карт во всем мире было создано именно на его основе.

Основное различие этих методов заключается в том, что границы между почвенными ареалами при точечном картографировании проводятся путем интерполяции между точками, а при факторном эти границы предопределяются границами факторов (рельефа, растительности, геологического строения, климата и т. д.). Кроме того, методы точечного картографирования были предложены для картографирования отдельных свойств почв, а факторные методы – для картографирования почв в терминах принятой классификации.

Основным недостатком методов точечного картографирования является большая трудоемкость. Для точного проведения границ необходимо заложение большого количества точек полевого обследования почв. Картографирование почв больших территорий этим методом очень затратно, зачастую практически невозможно и при мелкомасштабных работах может приводить к большим ошибкам в точности наведения почвенно-географических границ.

С другой стороны, при крупномасштабных работах, особенно при картографировании отдельных свойств почв, этот метод без сомнения может дать более точные результаты, чем факторный метод.

Установление почвенных границ при картографировании факторным методом осуществляется на основе данных описания полевых разрезов, заложенных в соответствии с представлениями о специфике так называемых почвенно-ландшафтных связей, и непосредственную границу устанавливают в большинстве случаев экспертным путем, базируясь на анализе пространственного варьирования рельефа и иных факторов почвообразования

[17]. Объектом картографирования почв этим методом являются выделы почв определенного классификационного положения. Это означает, что при использовании разных классификационных схем можно получить разную сеть контуров, то есть разные почвенные карты. Следовательно, конкретная почвенная карта, составленная таким методом, может служить основой для получения точной информации лишь о географии тех свойств почв, которые значимы в рамках используемых классификационных построений. При этом, конечно, часть свойств почв коррелирует в большей или меньшей степени с классификационно значимыми [3, 7, 9, 32, 34], но другие часто не демонстрируют подобной корреляции (например, агрохимические свойства почв, влажность и т. п.). С другой стороны, для оценки почвенных ресурсов (что и является одним из главных назначений почвенной карты) может возникнуть необходимость анализа специфики пространственного варьирования большего количества свойств почв. Например, согласно анализу специалистов FAO [59], при оценке земель только для растениеводства может быть задействовано около 55 свойств почв. При этом географию (закономерности пространственного варьирования) многих из них нельзя описать путем экспертного анализа классификационного положения почвы, и это означает, что информации традиционно составленной почвенной карты может быть недостаточно для оценки земель.

Кроме того, при факторном картографировании имеет большое значение качество информации о самих факторах почвообразования. Использование недостаточно качественных данных при составлении карт приводит к созданию некондиционной почвенной карты. Наиболее существенное значение это приобретает при картографировании почв в терминах Классификации и диагностики почв 2004 г. [38]. Присутствие в классификации большого количества антропогенно преобразованных почв приводит к повышенной важности информации о географии именно этого (антропогенного) фактора почвообразования. Причем не только в его современном виде, а с учетом его изменений как минимум за последнее столетие. В настоящее время еще не созданы подходы создания подобных карт антропогенного фактора, что делает использование вышеназванной классификации для картографирования почв (особенно в крупном масштабе) на основе факторных подходов очень трудным, если не невозможным.

Кроме того, во многих случаях при решении практических задач, требуется анализ не положения почв в той или иной классификации, а конкретных свойств почв. В идеале необходимы карты отдельных свойств почв. В рамках традиционных подходов основным путем их получения

является “экспертное приписывание” тех или иных значений свойств к их классификационному наименованию и “перекрашивание” традиционно созданной почвенной карты в карты отдельных свойств. В результате получают картограммы отдельных свойств, которые и используются для решения практических задач [11]. Но во многих случаях получаемые таким образом карты отдельных свойств почв являются очень огрубленными и схематичными, так как реальная география отдельных свойств почв часто не коррелирует с контурами на обычной почвенной карте.

## ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОЧВ

Бурное развитие геоинформатики привело в 90-е гг. прошлого века к внедрению в почвенную картографию ГИС технологий. На первых порах ГИС использовалась лишь как средство цифрового хранения векторизованных традиционно созданных почвенных карт и их совместного анализа с другими векторными картами [23]. Дальнейшее развитие в этом направлении привело к созданию методов цифрового картографирования почв [35], суть которых сводится к автоматизированному выявлению и формализации связей почва – факторы почвообразования с целью их дальнейшего использования для автоматизированного построения цифровых почвенных карт или карт отдельных свойств почв.

Научное направление “цифровая почвенная картография” (ЦПК) окончательно оформилось в 2003 г. с выходом статьи “О почвенном картографировании”, в которой McVratney et al. обобщили наработки по созданию почвенных карт в геоинформационных системах с использованием статистических методов для установления связей между почвами и факторами почвообразования [73]. В статье авторы предложили выделить новую парадигму почвенного картографирования, основанную на количественном моделировании, в отличие от традиционной парадигмы почвенного картографирования на основе качественных описаний [3]. Результатом формулирования новой парадигмы стало появление нового определения цифровой почвенной картографии, как создания и компьютерного производства почвенных пространственных информационных систем с помощью численного моделирования пространственной и временной изменчивости почв и их свойств на основе данных полевых обследований и по факторам почвообразования [69, 75]. В новом определении явно описан метод создания цифровых почвенных карт – численное моделирование, в то время как до появления новой парадигмы под цифровой почвенной картографией понимали любое использование компьютера для создания почвенных карт [23].

Направление ЦПК основано на моделях, развивающих гипотезу В.В. Докучаева о почве, как простой функции факторов почвообразования. Самые распространенные в направлении Цифровой почвенной картографии модели: CLORPT [43] и SCORPAN [73]. Модель CLORPT расшифровывается как Climate (климат), Organisms (организмы), Relief (рельеф), Parent material (почвообразующие породы), Time (время). Таким образом, модель CLORPT основана на использовании информации о факторах почвообразования, описанных в определении почвы В.В. Докучаева. В свою очередь, модель SCORPAN расшифровывается как Soil (почва), Climate (климат), Organisms (организмы), Relief (рельеф), Parent material (почвообразующие породы), Age (возраст территории), Spatial position (положение в пространстве) – то есть явно включает известную информацию о картографируемых почвах и их местоположении. Существует также направление ЦПК, основанное на геостатистике, когда почвенные свойства моделируются на основе стохастических моделей без учета факторов почвообразования [75]. Однако и в случае геостатистического подхода все больше используется дополнительная пространственная информация о факторах почвообразования, которую получают по космическим снимкам и тематическим картам.

Технологии цифрового почвенного картографирования уже нескольких десятилетий разрабатываются во многих странах мира: Австралии [70], Америке [49], Нидерландах [60], Дании [39, 57], Франции [42], России [4, 8, 12, 20, 28] и др. Разработанные технологии используются также и на глобальном уровне [41, 42].

При использовании точечных полевых данных в рамках подходов ЦПК достаточно составить представительную обучающую выборку и выбрать подходящий метод для построения статистической модели. Во многих случаях, особенно в России, актуальные полевые точечные данные отсутствуют в достаточном количестве, однако имеется архив уже построенных почвенных карт прошлых лет. Если имеются детальные почвенные карты, то возможно использовать подход к моделированию, по аналогии с подходом на основе точечных полевых данных, выбрав наиболее представительные точки на архивной карте. Однако часто встречается ситуация, когда архивные почвенные карты имеют более мелкий масштаб, чем масштаб составляемой почвенной карты. В таком случае, для моделирования связей почва – факторы почвообразования используются имеющиеся почвенные карты относительно мелкого масштаба, но при этом используется пространственная информация о факторах почвообразования выбранного масштаба картографирования. Таким образом, проводится дезагрегация архивной почвенной карты относительно мелкого мас-

штаба до выбранного более крупного масштаба или в выбранное более высокое пространственное разрешение с использованием детальной информации о факторах почвообразования выбранного масштаба почвенного картографирования.

Для моделирования связей почва – факторы почвообразования при картографировании по полевым точечным данным и по архивным почвенным картам в качестве пространственной информации о факторах почвообразования используются тематические карты или данные дистанционного зондирования. Традиционно используются тематические карты: растительности, климатические, геологические, гидрогеологические, экологические и др.

Моделирование связей почв с факторами почвообразования для картографирования почв обычно проводится в полностью статистическом виде на основе статистических методов: дискриминатного анализа [73], номинального регрессионного анализа [67], случайных лесов [61, 64], усиленных деревьев классификации [80], нейронных сетей [46] и других. Однако разработаны методы, в которых связи устанавливаются в виде, доступном для экспертного анализа и правки почвоведом без широких знаний в области статистики [25, 80]. В основе таких методов обычно лежат алгоритмы деревьев принятия решений при условии ограничения величины таких деревьев путем использования данных с заданным уровнем генерализации [4, 6], однако существуют и другие методы, например, на основе моделирования структурными уравнениями [40].

Существуют различные алгоритмы автоматизированного построения деревьев принятия решений на основе обучающей выборки: CART, ID3, C4.5/5.0, CHAID, MARS, Conditional Inference Trees и многие другие. Подобные алгоритмы используют при построении ветвей индексы, позволяющие учесть увеличение чистоты классов, прирост информации, снижение энтропии или другие характеристики. Возможно и использование нейронных сетей для создания деревьев принятия решений [44].

Один из широко распространенных методов и по совместительству один из первых в цифровой почвенной картографии – метод классификационных и регрессионных деревьев CART [68]. Особенности алгоритма CART состоят в возможности работы с качественными и количественными данными вместе. Алгоритм может работать с неполными данными с помощью суррогатных деревьев, алгоритм непараметрический, скорость работы алгоритма очень высокая, возможна работа с обучающими выборками малого размера, при построении деревьев рассчитывается ошибка кросс-валидации [50]. Расчет ошибки кросс-валидации проводится путем построения дерева

классификации по некоторой части обучающей выборки и использования оставшейся части для расчета количества неправильно классифицированных пикселей, затем выбираются другие части выборки для построения дерева и оценки ошибки, количество подобных операций задается пользователем, а итоговое значение ошибки рассчитывается как среднее для всех деревьев. Итоговое дерево принятия решений строится по всей обучающей выборке.

В связи с ограничениями отдельных подходов в последнее время стало обычным использовать несколько методов в дополнение друг к другу, например, регрессионный анализ с кригингом остатков – регрессионный кригинг [62]. Также используются ансамблевые методы, когда для каждой территории (пикселя или района) прогнозируются почвы с помощью разных моделей, но в качестве результата прогноза почвы или свойства почвы используется только прогноз наилучшей модели [74].

Ключевое значение для построения качественной модели связей почв с факторами почвообразования имеет качество составления обучающей выборки. В цифровой почвенной картографии для выбора мест отбора проб с учетом доступности для исследования, варибельности почв и факторов почвообразования разработаны различные методы на основе алгоритмов: кластеризации методом  $k$ -средних [53], латинского гиперкуба [74], OSPATS [82] и др.

Основное ограничение методов геостатистики заключается в том, что, в действительности, распределение почв и их свойств не зависит от расстояния между точками. Например, при измерении pH на некотором поле по постоянной сетке с шагом 10 м, между некоторыми двумя точками может находиться граница, где свойство меняется в пространстве резко и интерполяция значений pH с помощью простого кригинга по линейному закону никак это не сможет учесть, что приведет как к ошибкам в величине спрогнозированного pH, так и к неправильной оценке точности прогноза.

Еще одним ограничением современных подходов картографирования почв и их свойств, основанных на моделировании связей почв с факторами почвообразования, является недостаток реальных данных о свойствах почв и факторах почвообразования на тематических картах и данных дистанционного зондирования, что приводит к необходимости использования косвенной информации, уменьшающей точность картографирования. То есть для получения кондиционных результатов необходимо большое количество исходных точечных данных, сбор которых является трудоемким, что делает методы картографирования экономически неэффективными.

При применении статистических и геостатистических методов для построения почвенных карт большое значение имеет программное обеспечение и аппаратная база. В последнее время большое развитие получили языки программирования высокого уровня R и Python, которые значительно упрощают практическое применение статистических методов для реальных данных за счет возможности гибкой интеграции со многими программами. Для ряда типовых задач использование языков R и Python значительно проще, чем геоинформационных систем, позволяет проводить пакетную обработку данных, а, кроме того, многие скрипты могут быть запущены из тех же самых геоинформационных систем в интерактивном режиме.

Однако на практике во многих случаях использование высокоуровневых языков R и Python для автоматизации картографирования имеет свои ограничения: многие пакеты созданы только для определенных видов данных и с другими данными могут работать некорректно, скорость работы некоторых конструкций обычных для языков программирования общего назначения (C++, Pascal), например, циклов, настолько низкая, что зачастую приводит к необходимости специфической оптимизации программного кода, или даже встраивания фрагментов кода на языках программирования более низкого уровня. Все эти особенности приводят к тому, что, в широком ряде случаев, очень простая задача, которую мог бы решить почвовед-картограф без особых знаний в программировании с использованием пакетов расширений, в действительности, требует написания сложного кода для учета мелких недостатков пакетов.

С использованием высокоуровневых языков программирования созданы практические реализации многих подходов к цифровому почвенному картографированию.

DSMART — алгоритм пространственной дезагрегации почвенных карт на основе усиленных деревьев принятия решений, существуют реализации в виде пакетов для R и Python [80]. Особенность дезагрегации этим алгоритмом заключается во введении дополнительной экспертной информации о вероятности встретить ту или иную почву, например, для территории США были широко распространены карты хороплет. С помощью алгоритма DSMART было проведено построение карты вероятностей почвенных серий POLARIS для всей территории США на основе имеющейся базы данных SSURGO [54]. Для проведения дезагрегации с довольно высоким пространственным разрешением 30 м использовался суперкомпьютер. С помощью DSMART также была обновлена почвенная карта западной части Австралии [65]. Главное ограничение подхода состоит в за-

висимости от качества карт хороплет с вероятностями нахождения почв в различных областях, а также в высоких требованиях к аппаратной базе для проведения вычислений.

SoilGRIDs представляет собой автоматизированную систему производства пространственной почвенной информации на основе методов машинного обучения, реализованных преимущественно на языке R [61, 63]. С помощью SoilGRIDs созданы карты многих почвенных свойств, а также карты почвенных классов в терминах классификации WRB-2006 и USDA Soil Taxonomy. Особенности системы состоят в том, что автоматизированы алгоритмы установления связей и оформления карты, но не выбора ковариатов и не построения легенды. При смене классификации придется перестраивать алгоритмы построения карт и выбора ковариатов для картографирования, либо качество построенных карт a priori будет крайне низким. Для областей с малым количеством обучающих данных качество карт ниже, чем могло бы быть при использовании других подходов к картографированию [5]. Кроме того, карты почвенных классов представлены в виде нескольких сотен отдельных растровых карт для каждой почвы с вероятностью ее наличия в пикселях. Такое представление удобно использовать только для моделирования при условии использования пакетной обработки данных.

Кроме подходов на основе высокоуровневых языков программирования существуют и традиционные программные продукты для цифрового почвенного картографирования. Один из таких продуктов — почвенно-земельная система установления взаимосвязей SOLIM (Soil Land Inference System), которая представляет собой набор программных пакетов для создания почвенных карт на основе идей о нечеткой логике [87] и экспертных цепочек обработки данных [86]. Процесс картографирования в SOLIM существенно отличается от традиционного процесса картографирования необходимостью знания процедур обработки космических данных и представлением информации о почвах в виде вероятности нахождения классов в пикселе. Между тем, выглядит возможным создание более удобных для традиционных почвоведов программ с разделением непосредственно почвенных знаний и технической обработки космических снимков.

Достаточно хорошо изучены методы оценки качества цифровых почвенных карт классов. Однако для карт количественных почвенных свойств, для которых возможно использование обычных статистических методов оценки результатов, в действительности, пока нет общей методологии сравнения их друг с другом и в целом общепринятой оценки их качества с учетом пространственных ошибок.

Несмотря на сложный математический и статистический аппарат, используемый в подходах ЦПК, в их основе, как и в традиционном картографировании почв, также лежит факторная парадигма В.В. Докучаева. Как и при традиционном факторном картографировании, в ЦПК границы между таксонами почв устанавливаются по факторам почвообразования. От них же зависят и поля свойств почв в случаях картографирования не классификационных выделов, а отдельных свойств. Таким образом, эти подходы без сомнения являются развитием традиционных факторных подходов, но на новом научном уровне.

### КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОЧВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Данные дистанционного зондирования (ДДЗ) используются при составлении почвенных карт уже много лет. В первой половине XX в. широко использовались аэрофотоснимки [31]. После того, как стали доступны спутниковые данные, они также стали использоваться по аналогии с аэрофотоснимками [29].

Но если в прошлом веке ДДЗ использовались для визуального дешифрирования почв по фотоотпечаткам, то в настоящее время делаются попытки автоматизации процесса дешифрирования, и использования ДДЗ как одного из источников информации в технологиях цифрового картографирования почв.

В научных публикациях можно найти примеры попыток автоматизированного дешифрирования по ДДЗ непосредственно почв (классификационных выделов), а не их отдельных свойств [13]. Очень часто для этого используются методы неконтролируемой классификации многоканальных изображений на заданное число классов с их последующей тематической интерпретацией [52]. То есть каждому классу экспертно приписывают соответствующее ему название почвы в принятой классификации. В рамках этих подходов редко проверяется точность подобного соответствия, которая в большинстве случаев не очень высока. При этом, чем крупнее масштаб составляемых карт, тем больше вероятность неточностей в локализации почвенно-географических границ. Связано это с тем, что характер изображения поверхности почв или растительности не всегда связан с классификационным положением почв, а часто определяется классификационно незначимыми свойствами поверхности почв, или особенностями растительности, которые не являются индикаторными по отношению к почвам.

Очень большое количество работ посвящено разработке методов автоматизированного дешифрирования по ДДЗ отдельных свойств поверх-

ностного горизонта почв, таких как содержание гумуса [1, 19, 36, 45, 48, 56, 84], влажность почв [51, 55], засоленность почв [15, 58, 66, 71, 79], гранулометрический состав почв [19, 72, 85], каменистость поверхности почв [18], карбонатность почв [76], минералогический состав почв [37, 76–78]. В большинстве случаев речь идет о дешифрировании свойств по характеру изображения их открытой поверхности и по многоканальным изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. Методически работы базируются преимущественно на регрессионном анализе, методе главных компонент, реже на использовании нейронных сетей или более сложных подходах.

Получаемые на основе этих подходов карты отдельных свойств почв теоретически могут быть использованы в качестве дополнительной информации и при построении почвенных карт (в терминах той или иной классификации). Но для этого требуются дополнительные исследования по установлению связей между дешифрируемыми свойствами поверхностного горизонта почв и их классификационным положением. В большинстве случаев такие связи с одним свойством установить невозможно, так как классификационно значимыми являются обычно несколько свойств, причем не только поверхностного горизонта почв. Возможности же дешифрирования по ДДЗ свойств подповерхностных горизонтов почв в настоящее время практически не исследованы, несмотря на большое разнообразие ДДЗ (включая радарные и гиперспектральные данные).

Все описанные выше подходы имеют свои преимущества и недостатки. В обобщенном виде они отражены в табл. 1.

Кроме того, необходимо отметить, что во всех перечисленных выше подходах подразумевается наличие полевых данных о почвах и/или априорных знаний об особенностях географии почв региона исследований.

Использование подходов, основанных на прямых дешифровочных признаках (анализе изображения открытой поверхности почв) с одной стороны ограничивается закрытостью большую часть года поверхности почв растительностью, а с другой слабой изученностью связи спектральной отражательной способности поверхности почв с их свойствами и связей свойств поверхности почв со свойствами нижележащих генетических горизонтов.

Необходимо отметить, что сама отражательная способность почв также недостаточно изучена. Имеющиеся библиотеки спектров отражения почв [47, 81] характеризуют предварительно обработанные образцы почв (высушенные, измельченные до заданного размера, выровненная поверхность). Но в естественных условиях на све-

**Таблица 1.** Специфика подходов к использованию ДДЗ для составления почвенных карт [24]

Подход	Преимущества	Недостатки
1. Визуальное дешифрирование почв по ДДЗ	Максимальное задействование экспертных знаний почвовед-дешифровщика; возможность визуальной “фильтрации” неоднородностей изображения, не связанных с почвенным покровом	Высокая трудоемкость и неоперативность; субъективность и неточность наведения границ почвенно-географических выделов
2. Автоматизированное дешифрирование почв по ДДЗ	Оперативность, воспроизводимость	Не все почвы могут быть дешифрированы; проблемы с автоматической фильтрацией неоднородностей изображения, не связанных с почвами, влияние на результат свойств почв и растительности, не важных для составления почвенных карт
3. Дешифрирование отдельных свойств почв и использование этих данных при составлении почвенной карты	Возможность получения данных о реальной географии отдельных свойств почв; оперативность, воспроизводимость	Не все необходимые свойства почв могут быть дешифрированы; слабая изученность связи свойств поверхности почв со свойствами их профиля; короткие периоды открытости поверхности почв для съемки
4. ДДЗ как часть технологии цифрового картографирования почв	Более объективная и актуальная информация о свойствах поверхности почв и о факторах почвообразования; оперативность; возможность получения статистической оценки точности создаваемых карт	Невозможность переноса установленных связей ДДЗ—почва на другие регионы и другие сцены; ограниченность выбора ДДЗ необходимого пространственного разрешения и срока съемки

тоотражение почв оказывают дополнительное влияние такие факторы, как влажность почв, шероховатость ее поверхности, а также особенности трансформации поверхности почв под воздействием атмосферных условий [22, 27]. Эти факторы могут значительно изменять специфику отражения электромагнитных волн поверхностью почв, но эти процессы в настоящее время недостаточно изучены.

Важно отметить, что эффективность перечисленных групп подходов зависит и от уровня обобщения (масштаба составляемой карты). Подходы, базирующиеся на дешифрировании отдельных свойств почв, имеет смысл использовать лишь при составлении крупномасштабных и детальных почвенных карт, а подходы визуального дешифрирования наиболее эффективны при картографировании почв в мелком масштабе при использовании косвенных дешифровочных признаков.

Использование характера изображения растительности на ДДЗ как дешифровочного признака почв ограничивается недостаточной изученностью ее индикационной роли по отношению к почвам, а также ее динамичностью, связанной как с антропогенным воздействием, так и с естественными процессами. В некоторых случаях естественная растительность может уверенно индцировать почвы [14, 83]. Контрастные компоненты

почвенного покрова как правило индицируются даже культурной растительностью, но возможности индикации ограничиваются фенофазой развития посевов, их засоренностью и регионом работ [10].

Необходимо отметить, что в настоящий момент наблюдается тенденция все большего сопряжения методов цифровой картографии почв и методов, основанных на ДДЗ, которые могут служить как источником информации о географии отдельных свойств почв, так и источником данных о факторах почвообразования. Совместное использование этих методов уже в ближайшей перспективе позволит автоматизировать многие этапы составления почвенных карт и особенно карт отдельных свойств почв.

### ДРУГИЕ ПОДХОДЫ И ИДЕИ

Изложенные методы и подходы к картографированию почв отражают внедрение компьютерных и дистанционных технологий в процесс картографирования. Как следует из приведенного выше обзора, эти технологии дают возможность повысить объективность и информативность почвенных карт, сделать процесс их изготовления более воспроизводимым и оперативным. Но по своей сути они не сильно изменяют общей методологии картографирования, которая была заложена

еще Докучаевым. При этом необходимо отметить, что в процессе эволюции докучаевских методов картографирования почв периодически возникали оригинальные идеи именно с точки зрения усовершенствования самих подходов, а не их автоматизации и компьютеризации. Справедливости ради следует отметить, что подобные идеи по разным причинам так и не были воплощены в широкую практику картографирования почв.

Среди подобных предложений наиболее известны следующие:

1. Метод “пластики рельефа”. В 80-е гг. прошлого века Степанов предложил свой оригинальный метод картографирования почв – метод пластики рельефа [33]. Этот метод можно считать некоей разновидностью факторных подходов, при которой ведущая роль при картографировании придается рельефу. Своеобразный “каркас” почвенной карты при этом подходе образует нулевая морфоизографа (линия перегиба склона), которая теоретически разделяет участки склона с потенциальным смывом и намывом почвы. Таким образом, делается попытка внесения на почвенную карту информации о протекающих процессах (или о потенциальных возможностях их протекания). Но ни автор, ни его последователи не предложили доказательств того, что нулевая морфоизографа совпадает с границами почвенно-географических выделов, или же соответствует границам между какими-либо грациями свойств почв. Таким образом, на почвенной карте появляется граница, которая почвенно-географически не обусловлена. Следовательно, почвенная карта, построенная методом пластики рельефа, дает искаженное представление о географии почв.

Но, с другой стороны, метод пластики рельефа может рассматриваться как предтеча современных методов цифрового картографирования почв.

Эти подходы в основном были использованы для создания почвенных карт среднего и мелкого масштаба, но были подвергнуты критике почвоведов-картографов, работающих на основе традиционных подходов [30]. Метод “пластики рельефа” в настоящее время при картографировании почв почти не используется.

2. С целью повышения информационной емкости почвенных карт в 90-е гг. прошлого века было предложено путем разного изображения границ карты обогащать ее информацией о резкости или постепенности переходов между почвами, о динамичности границ [21, 26]. Далее Горячкиным в рамках методологии качественного моделирования генезиса и эволюции почвенного покрова было предложено показывать границы на почвенных картах различными линиями в зависимости от характера создающего их процесса и механизмов дифференциации почвенного по-

крова [2]. Таким образом, предлагалось усовершенствовать методы традиционного картографирования почв, внося на почвенные карты дополнительную важную информацию путем различного изображения почвенных границ. Подобные идеи были опробованы лишь на небольших тестовых участках и дальнейшего развития до сих пор не получили, несмотря на их высокую практическую значимость. Но при переходе на цифровые технологии создания почвенных карт они вполне могут быть задействованы уже в ближайшее время.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный этап развития картографирования почв характеризуется практически полным прекращением создания бумажных почвенных карт и переходом на цифровые технологии. Приоритетное развитие получили технологии цифрового картографирования почв, а также методы, основанные на данных дистанционного зондирования. Но о переходе на полностью автоматизированные подходы картографирования почв больших территорий на данном этапе речи не идет. По-видимому, это дело отдаленного будущего.

Технология цифрового картографирования почв, по сути, базируется на традиционных факторных подходах В.В. Докучаева и современных подходах компьютерного моделирования и геостатистики. Основным недостатком этих подходов является то, что для их корректного использования требуется большое количество полевых точечных данных, которых в большинстве стран мира нет, а организация их сбора приводит к росту затрат и экономической неэффективности составления почвенных карт. В большей степени эти подходы эффективны для картографирования классификационных выделов почв, а также для создания почвенных карт высокого пространственного разрешения.

Подходы, основанные на использовании данных дистанционного зондирования, напротив, позволяют сократить необходимость данных полевого почвенного обследования и более подходят для картографирования карт отдельных свойств почв, а не их классификационных выделов. Но до сих пор на основе этих подходов надежно картографируются лишь отдельные свойства почв, причем их поверхностного горизонта, и эффективность картографирования варьирует от региона к региону.

В последние годы наблюдается тенденция к конвергенции этих подходов в направлении использования данных автоматизированного дешифрирования почв и их свойств по ДЗЗ в качестве одного из источников информации в технологиях цифровой почвенной картографии.

При дальнейшем развитии методов цифрового картографирования почв уже в ближайшем будущем могут быть задействованы и ранее высказанные идеи внесения на почвенные карты дополнительной информации о динамичности и механизмах дифференциации почвенного покрова.

**Благодарности.** Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ № 18-016-00052 и РНФ № 14-17-00171.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ачасов А.Б., Бидолах Д.И. Использование материалов космической и наземной цифровой фотосъемки для определения содержания гумуса в почвах // Почвоведение. 2008. № 3. С. 280–286.
2. Горячкин С.В. Моделирование генезиса и эволюции почвенного покрова // Почвоведение. 1996. № 1. С. 89–98.
3. Докучаев В.В. Сочинения. Т. 4. Ч. 1. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 413 с.
4. Жоголев А.В. Актуализация региональных почвенных карт на основе спутниковых и геоинформационных технологий (на примере Московской области). Автореф. дис. ... канд. с.-х. н. М., 2016. 22 с.
5. Жоголев А.В. Создание цифровой региональной почвенной карты на основе точечной информации с крупномасштабных почвенных карт // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование. Тез. докл. конференции к 90-летию основания Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. С. 11–12.
6. Жоголев А.В., Савин И.Ю. Автоматизированное обновление среднимасштабных почвенных карт // Почвоведение. 2016. № 11. С. 45–54. doi 10.7868/S0032180X16110125
7. Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. М.: Наука, 1970. 219 с.
8. Кириллова Н.П., Силева Т.М., Ульянова Т.Ю., Савин И.Ю. Метод “совпадений” и его применение для построения цифровой крупномасштабной почвенной карты // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1193–1203.
9. Кирсанов А.Т. Заключение // Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1935. Т. 12. С. 297–304.
10. Кирьянова Е.Ю., Савин И.Ю. Неоднородность посевов, определяемая по спутниковым данным MODIS, как индикатор контрастности почвенного покрова // Докл. Российской академии сельскохозяйственных наук. 2013. № 3. С. 36–39.
11. Кирюшин В.И., Кирюшин С.В. Агротехнологии. СПб.: Лань, 2017. 464 с.
12. Козлов Д.Н. Цифровой ландшафтный анализ при крупномасштабном картографировании структур почвенного покрова. Автореф. дис. ... канд. геогр. н. М., 2009. 26 с.
13. Конюшкова М.В., Козлов Д.Н. Автоматизированный анализ распространения темноцветных черноземовидных почв в северном Прикаспии по данным космической съемки (на примере Джаныбекского стационара) // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 5. С. 46–56.
14. Кравцова В.И. Космические методы картографирования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 240 с.
15. Мохамед Е.С., Али А.М., Ширбени М.А.Э., Разек А.А.А.Э., Савин И.Ю. Использование ближнего инфракрасного диапазона для спектрометрической оценки загрязнения почв дельты Нила // Почвоведение. 2016. № 6. С. 690–696.
16. Нефедов Г.Ф. О почвенной картографии. Саратов: Тип. об-ва книгопеч., 1914. 57 с.
17. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования. М.: Колос, 1973. 95 с.
18. Прудникова Е.Ю. Автоматизированное картографирование почв по спутниковым данным для проектирования АЛСЗ. Автореф. дис. ... канд. биол. н. М., 2013. 30 с.
19. Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю. Спутниковая оценка дегумификации пахотных почв в Саратовском Поволжье // Почвоведение. 2015. № 5. С. 597–604.
20. Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н., Сиунова Е.В., Санковский А.Г. Оценка запасов органического вещества в почвах мира: методика и результаты // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1427–1440.
21. Савин И.Ю. Дешифрирование почвенного покрова лесостепи Центрально-черноземного района по среднимасштабным космическим снимкам. Автореф. дис. ... канд. геогр. н. М., 1990. 27 с.
22. Савин И.Ю. Влияние ливневого дождя на интегральную отражательную способность поверхности черноземных почв // Почвоведение. 1995. № 8. С. 976–980.
23. Савин И.Ю. Инвентаризация почв с использованием ГИС технологий // Почвоведение. 2003. № 10. С. 1189–1196.
24. 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.
25. Савин И.Ю. Компьютерная имитация картографирования почв // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. 2012. С. 26–34.
26. Савин И.Ю. О границах почвенно-картографических выделов // География и картография почв. М.: Наука, 1993. С. 228–234.
27. Савин И.Ю. О тоне изображения открытой поверхности почв как прямом дешифровочном признаке // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2013. № 71. С. 52–64.
28. Савин И.Ю., Симакова М.С., Овечкин С.В. Перспективы развития картографии почв в России // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование. 2015. С. 274–279.
29. Савин И.Ю., Симакова М.С. Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в

- России // Современные проблемы дистанционно-го зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 104–115.
30. Симакова М.С. О новом методе картографирования почв с использованием пластики рельефа // Почвоведение. 1988. № 6. С. 121–127.
  31. Симакова М.С., Савин И.Ю. Использование материалов аэро- и космической съемки в картографировании почв (пути развития, состояние, задачи) // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1339–1347.
  32. Сорокина Н.П. Применение статистических методов при уточнении диагностики черноземов // Крупномасштабное картографирование почв (методы, теория и практика). М., 1971. С. 123–128.
  33. Степанов И.Н., Абдуназаров У.К., Брынских М.Н., Деева Н.Ф., Ильина А.А., Пейдо Л.П., Поветушина З.Ф., Хакимов Ф.И. Временная методика по составлению карт пластики рельефа крупного и среднего масштаба. Рекомендации. Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1983. 20 с.
  34. Тюремнов С.И. Северная граница чернозема в центральной части европейского СССР // Почвоведение. 1925. № 1–2. С. 77–94.
  35. Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования / Ред. А.Л. Иванов и др. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. 333 с.
  36. Чинилин А.В., Савин И.Ю. Крупномасштабное цифровое картографирование содержания органического углерода почв с помощью методов машинного обучения // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. № 91. С. 46–62.
  37. Чинилин А.В., Чижилова Н.П., Савин И.Ю., Варламов Е.Б. Минералогический состав черноземов обыкновенных ЦЧО, подстилаемых неогеновыми песками // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование. Тез. докл. конф. к 90-летию основания Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. С. 108–109.
  38. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
  39. Adhikari K., Minasny B., Greve M.B., Greve M.H. Constructing a soil class map of denmark based on the fao legend using digital techniques // Geoderma. 2014. V. 214–215. P. 101–113.
  40. Angelini M.E., Heuvelink G.B., Kempen B., Morras D.M., Rodriguez D.M. Digital soil mapping of an Argentinian pampa region using structural equation modelling. In Book of Abstracts of the Wageningen Soil Conference 2015: Soil Science in a Changing World. 2015. P. 134–134.
  41. Arrouays D., Savin I., Leenaars J., McBratney A.B. (eds.) GlobalSoilMap – Digital Soil Mapping from Country to Globe: Proceedings of the Global Soil Map 2017 Conference, July 4–6, 2017. M.: CRC Press. 2018. 174 p.
  42. Arrouays D., Grundy M.G., Hartemink A.E., Hempel J.W., Heuvelink G.B.M., Young Hong S., Lagacherie P., Lehtyk G., McBratney A.B., McKenzie N.J., Mendonca-Santos M.L., Minasny B., Montanarella L., Odeh I.O.A., Sanchez P.A., Thompson J.A., Gan-Lin Zhang. GlobalSoil-Map: Toward a Fine-Resolution Global Grid of Soil Properties // Advances in Agronomy. 2014. V. 125. P. 93–134.
  43. Amundson R., Jenni H. The place of humans in the state factor theory of ecosystems and their soils // Soil Science. 1991. V. 151. P. 99–109.
  44. Balestrieri R. Neural Decision Trees // arXiv preprint arXiv:1702.07360. 2017.
  45. Bartholomeus H.M., Schaepman E.M., Kooistra L., Stevens A., Hoogmoed B.W., Spaargaren O.S.P. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification // Geoderma. 2008. V. 145. P. 28–36.
  46. Behrens T., Förster H., Scholten T., Steinrücken U., Spies E.D., Goldschmitt M. Digital soil mapping using artificial neural networks // J. Plant Nutrition and Soil Science. 2005. V. 168(1). P. 21–33.
  47. Bellinaso H., Demattê J.A.M., Romeiro S.A. Soil spectral library and its use in soil classification // R. Bras. Ci. Solo. 2010. № 34. P. 861–870.
  48. Ben-Dor E., Chabrilat S., Demattê J.A.M., Taylor G.R., Hill J., Whiting M.L., Sommer S. Using Imaging Spectroscopy to Study Soil Properties // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. P. 38–55.
  49. Brevik E.C., Hartemink A.E. Soil Maps of the United States of America // Soil Sci. Soc. Am. J. 2013. V. 77. P. 1117–1132. doi 10.2136/sssaj2012.0390
  50. Breiman L., Friedman J., Stone C.J., Olshen R.A. Classification and regression trees. Florida: CRC press. 1984. 368 p.
  51. Brocca L., Tullo T., Melone F., Moramarco T., Morbidelli R. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability // J. Hydrology. 2012. V. 422. P. 63–75.
  52. Browning D.M., Duniway M.C. Digital soil mapping in the absence of field training data: a case study using terrain attributes and semiautomated soil signature derivation to distinguish ecological potential // Applied and Environmental Soil Science. 2011. V. 2. Article ID 421904. P. 1–12.
  53. Brus D.J., De Grujter J.J., Van Groenigen J.W. Designing spatial coverage samples using the k-means clustering algorithm // Developments in Soil Science. 2006. V. 31. P. 183–192.
  54. Chaney N.W., Wood E.F., McBratney A.B., Hempel J.W., Nauman T.W., Brungard C.W., Odgers N.P. POLARIS: A 30-meter probabilistic soil series map of the contiguous United States // Geoderma. 2016. V. 274. P. 54–67.
  55. De Jeu R., Dorigo W. On the importance of satellite observed soil moisture // Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation. 2016. V. 45. Part B. P. 107–109.
  56. Gomez C., Lagacherie P., Coulouma G. Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements // Geoderma. 2008. V. 148. № 2. P. 141–148.
  57. Greve M.H., Breuning-Madsen H. Soil mapping in Denmark // European Soil Bureau Research Report. 1999. № 6. P. 49–56.
  58. Grissa M., Abdelfattah R., Mercier G., Zribi M., Chahbi A., Lili-Chabaane Z. Empirical model for soil salinity

- mapping from SAR data // Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2011 IEEE International. IEEE. 2011. P. 1099–1102.
59. Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture. Rome: FAO, 1983. 237 p.
  60. *Hartemink A.E., Sonneveld M.P.* Soil maps of the Netherlands // *Geoderma*. 2013. V. 204. P. 1–9.
  61. *Hengl T.* GSIF: Global Soil Information Facilities. R Package Version 0.4-1. 2014.
  62. *Hengl T., Heuvelink G.B.M., Stein A.* A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging // *Geoderma*. 2004. V. 120. № 1. P. 75–93.
  63. *Hengl T., de Jesus J.M., Heuvelink G.B., Gonzalez M.R., Kilibarda M., Blagotić A., Guevara M.A.* SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning // *PloS One*. 2017. V. 12(2). e0169748.
  64. *Hengl T., de Jesus J.M., MacMillan R.A., Batjes N.H., Heuvelink G.B., Ribeiro E., Gonzalez M.R.* SoilGrids1km — global soil information based on automated mapping // *PLoS One*. 2014. V. 9(8). e105992.
  65. *Holmes K.W.* Spatial disaggregation of conventional soil mapping across Western Australia using DSMART // *GlobalSoilMap: Basis of the global spatial soil information system*. London: Taylor & Francis. 2014. P. 273–279.
  66. *Jabbar M.T., Chen X.* Land degradation due to salinization in arid and semi-arid regions with the aid of geoinformation techniques // *Geo Spatial Inf. Sci.* 2008. V. 11(2). P. 112–120.
  67. *Kempen B., Brus D.J., Heuvelink G.B., Stoorvogel J.J.* Updating the 1: 50.000 Dutch soil map using legacy soil data: A multinomial logistic regression approach // *Geoderma*. 2009. V. 151(3). P. 311–326.
  68. *Lagacherie P., Holmes S.* Addressing geographical data errors in a classification tree for soil unit prediction // *International J. Geographical Information Science*. 1997. V. 11. № 2. P. 183–198.
  69. *Lagacherie P., McBratney A.B.* Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping // *Developments in Soil Science*. 2006. V. 31. P. 3–22.
  70. *Lagacherie P., McBratney A., Voltz M.* Digital soil mapping: an introductory perspective. Elsevier, 2006. V. 31. 658 p.
  71. *Lhissou R., Harti A. El., Chokmani K.* Mapping soil salinity in irrigated land using optical remote sensing data // *Eurasian J. Soil Science*. 2014. № 3. P. 82–88.
  72. *Marchetti A., Piccini C., Francaviglia R., Santucci S., Chiuchiarelli I.* Estimating Soil Organic Matter Content by Regression Kriging // *Digital Soil Mapping*. Springer: Netherlands, 2010. P. 241–254.
  73. *McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B.* On digital soil mapping // *Geoderma*. 2003. V. 117(1–2). P. 3–52.
  74. *Minasny B., McBratney A.B.* A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information // *Computers & Geosciences*. 2006. V. 32(9). P. 1378–1388.
  75. *Minasny B., McBratney A.B.* Methodologies for global soil mapping // *Digital Soil Mapping: Bridging Research, Environmental Application, and Operation*. Springer. 2010. V. 2. P. 429–436.
  76. *Mulder V.L., de Bruin S., Schaepman M.E., Mayr T.R.* The use of remote sensing in soil and terrain mapping. A review // *Geoderma*. 2011. V. 162. P. 1–19.
  77. *Nield S.J., Boettinger J.L., Ramsey R.D.* Digitally mapping gypsic and natric soil areas using Landsat ETM data // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2007. V. 71. № 1. P. 245–252.
  78. *Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J.* Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared “radiance-at-sensor” data // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 99. № 1. P. 127–139.
  79. *Odeh I.O.A., Onus A.* Spatial analysis of soil salinity and soil structural stability in a semi-arid region of New South Wales, Australia // *Environ. Management*. 2008. V. 42(2). P. 265–278.
  80. *Odgers N.P., Sun W., McBratney A.B., Minasny B., Clifford D.* Disaggregating and harmonizing soil map units through resampled classification trees // *Geoderma*. 2014. V. 214. P. 91–100.
  81. *Rossel R.V., Behrens T.W., Ben-Dor E., Brown D.J., Dematte J.A., Shepherd K., Shi Z., Stenberg B., Stevens A., Adamchuk V., Aichi H., Barthès B.G., Bartholomeus H.M., Bayer A.D., Bernoux M., Bottcher K., Brodsky L., Du C.W., Chappell A., Fouad Y., Génot V., Gomez C., Grunwald S., Gubler A., Guerrero C., Hedley C.B., Knadel M., Morras H.J.M., Nocita M., Ramirez-Lopez L., Roudier P., Rufasto Campos E.M., Sanborn P., Sellitto V.M., Suduth K.A., Rawlins B.G., Walter C., Winowiecki L.A., Hong S.Y., Ji W.* A global spectral library to characterize the world’s soil // *Earth Science Reviews*. 2016. V. 155. P. 198–230. doi 10.1016/j.earscirev.2016.01.012
  82. *Saby N., Minasny B., Arrouays D., De Gruijter J., Malone B.P., Mcbratney A.B.* Designing soil monitoring schemes for large areas based on high resolution digital soil mapping products: a case study from France // *Pedometrics*. 2017. P. 298.
  83. *Serteser A., Kargoğlu M., Içağa Y., Konuk M.* Vegetation as an Indicator of Soil Properties and Water Quality in the Akarçay Stream (Turkey) // *Environ. Managem.* 2008. V. 42. P. 764.
  84. *Tiwari S., Saha S., Kumar S.* Prediction modeling and mapping of soil carbon content using artificial neural network, hyperspectral satellite data and field spectroscopy // *Advances in Remote Sensing*. 2015. № 4. P. 63–72.
  85. *Wang D.-C., Zhang G.-L., Zhao M.-S.* Retrieval and mapping of soil texture based on land surface diurnal temperature range data from MODIS // *PLoS One*. 2015. V. 10. № 6. e0129977.
  86. *Zhu A.X., Hudson B., Burt J., Lubich K., Simonsonet D.* Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2001. V. 65. № 5. P. 1463–1472.
  87. *Zhu A.X., Band L., Vertessy R., Dutton B.* Derivation of soil properties using a soil land inference model (SOLIM) // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1997. V. 61(2). P. 523–533.

## Modern Trends and Problems of Soil Mapping

I. Yu. Savin<sup>a, b, \*</sup>, A. V. Zhogolev<sup>a</sup>, and E. Yu. Prudnikova<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute, 119017, Moscow, Pyzhevsky per., 7, Russia*

<sup>b</sup>*Belgorod State University, 308015, Belgorod, Pobeda str., 85, Russia*

<sup>c</sup>*Agrarian-Technological Institute, RUDN University, 117198, Moscow, Miklukho-Maklay str., 6, Russia*

*\*e-mail: savin\_iyu@esoil.ru*

Main trends in the development of soil mapping methods are discussed, and the main problems are identified. At the moment, the transition from the “paper” soil maps to digital soil-geographical databases has already been completed. As the main method at all levels of generalization, the digital mapping of soils and their properties is accepted. The approaches of digital soil mapping, as well as of the traditional one, are based on the ideas of V.V. Dokuchaev on the dependence of soils on soil forming agents; however in the process of mapping new achievements in mathematical statistics and mathematical modeling are involved. This provides greater objectivity and reproducibility of the digital maps in comparison with the traditional ones. At the same time, all unresolved problems of soil cartography related to the lack of field data, scale, soil taxonomy, spatial microheterogeneity, mapping of individual soil properties are preserved. Partially, these problems can be solved by using remote sensing data. In recent years, there has been a trend of the convergence of these approaches towards the use of data from automated deciphering of soils and their properties by remote sensing as one of the sources of information in digital soil mapping technologies.

*Keywords:* digital soil mapping, remote sensing data, GIS, soil map