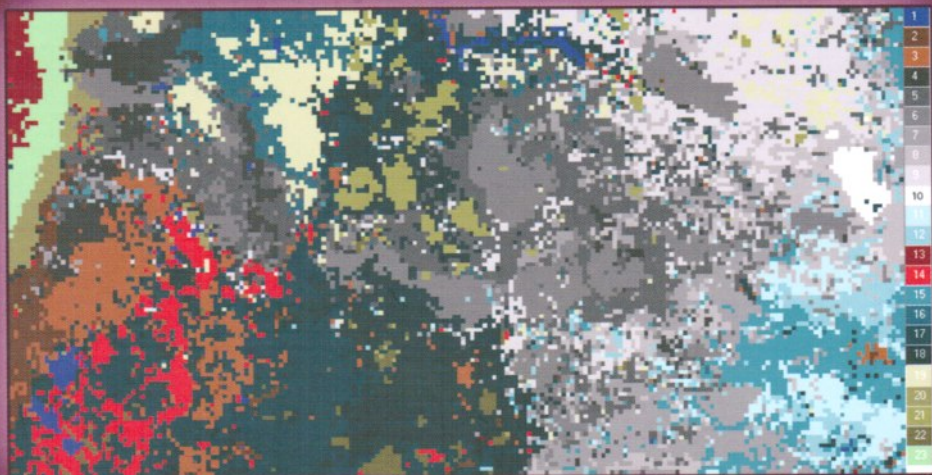


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАУК
ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ им. В.В. ДОКУЧАЕВА
ВСЕРОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ПОЧВОВЕДОВ им. В.В. ДОКУЧАЕВА

ЦИФРОВАЯ ПОЧВЕННАЯ КАРТОГРАФИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



МОСКВА
2012

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАУК
ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.В. ДОКУЧАЕВА
ВСЕРОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ПОЧВОВЕДОВ ИМ. В.В. ДОКУЧАЕВА

**ЦИФРОВАЯ ПОЧВЕННАЯ КАРТОГРАФИЯ:
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

к 85-летию
Почвенного института им. В.В. Докучаева

Москва
2012

Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. Сборник статей. -

М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. – 350 с.

Главный редактор академик Россельхозакадемии А.Л. Иванов.

Редколлегия: Н.П. Сорокина (отв. ред.), И.Ю. Савин (отв. ред.), В.П. Самсонова, Ю.Л. Мешалкина, М.В. Конюшкова.

Рецензенты: профессор, д.г.н. А.С. Викторов,
профессор д.с.-х.н. В.П. Белобров.

В книге представлены результаты современных отечественных почвенно-картографических исследований, содержащих опыт использования цифровых методов. Статьи авторов из ряда организаций почвенно-географической и сельскохозяйственной направленности (Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, Факультет почвоведения и географический факультет МГУ, Ин-т географии РАН, Ин-т физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Ин-т математических проблем биологии РАН, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, ВНИИА им Д.Н. Прянишникова, Институт геохимии и аналитической химии им В.И. Вернадского РАН, Ин-т биологии КарНЦ РАН) освещают различные стороны многоаспектной проблемы современной почвенной картографии. 20 статей объединены в 4 раздела. В первом рассматриваются общие теоретические и методологические вопросы цифровой почвенной картографии (ЦПК), даны статьи обзорного характера. Второй раздел посвящен источникам информации, базам данных и некоторым методическим аспектам картографирования. В третьем и четвертом разделах излагается опыт применения компьютерных методов при создании почвенных карт разного содержания (базовых генетических, прикладных, карт отдельных свойств) и разных масштабов. Сборник является итогом 6-летней работы семинара по цифровой почвенной картографии, который проводился в Почвенном институте им. В.В. Докучаева в рамках совместных заседаний подкомиссии по картографии и комиссии по педометрике Общества почвоведов им. В.В. Докучаева.

Книга рассчитана на специалистов в области почвенного, почвенно-экологического, почвенно-агрохимического, ландшафтного картографирования и смежных дисциплин.

Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии *

Д.Н. Козлов¹, Н.П. Сорокина²

¹Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,

²Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва

daniilkozlov@gmail.com

Аннотация. Развитие цифровых методов и технологий информационного анализа определили начало качественно нового этапа в развитии почвенной картографии. Его отличительные черты — высокая степень формализации всех стадий разработки картографической модели, снижение стоимости и повышение скорости картирования при объективном контроле достоверности результатов и расширении возможностей содержательного анализа почвенно-ландшафтных связей. В статье рассматриваются специфические теоретические, методические, технологические и организационные проблемы крупномасштабной почвенной картографии с отображением структуры почвенного покрова (СПП). При переходе к цифровым методам общая схема картографирования СПП сохраняется, но ряд методических задач получает новые решения, обеспечивающие внедрение математических методов в область экспертных знаний. Вне их компетенции по-прежнему остаются такие принципиальные вопросы как интерпретация результатов картографирования и объяснение механизмов дифференциации почвенного покрова конкретной территории. Эти обстоятельства определяют одинаково высокие требования к математической и профильной подготовке и квалификации специалистов в области цифровой почвенной картографии.

Факторы развития почвенной картографии

История отечественной и мировой крупномасштабной почвенной картографии (Шершукова, 1971) показывает, что ее развитие определяется совместным воздействием трех факторов: 1) запросами практики (социальным заказом), 2) состоянием почвенной науки и 3) ее технологическим уровнем (рисунок 1).

Стимулом или, напротив, тормозом развития может выступать каждый из этих трех факторов. Так, формирование колхозов и совхозов в 1930-е гг. вызвало необходимость массовых крупномасштабных почвенных съемок. В послевоенный период масштабные почвенные обследования выполнялись

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-2859.2011.5 и гранта РФФИ № 11-04-02064-а.

для обеспечения учета и агропроизводственной оценки земель, обоснования агрохимических и мелиоративных мероприятий. Внедрение аэрокосмических методов в 1950-60-е гг. имело революционное значение не только непосредственно для почвенной картографии, но и для развития концепции структуры почвенного покрова, оказавшей впоследствии, начиная с 1970-х гг., определяющее влияние на методологию почвенной картографии. Среди факторов, препятствующих в разное время развитию крупномасштабной картографии, назовем два: отсутствие до 1960-х гг. топографических основ, а также проблему классификации и диагностики почв низших таксономических уровней. В таблице 1 представлены этапы развития крупномасштабной почвенной картографии в России на основе обобщения Г.А. Шершуковой (1971).



Рис. 1. Факторы развития почвенной картографии

Особенности современного этапа почвенного картографирования

В настоящее время основным фактором развития тематической картографии является распространение цифровых технологий получения и обработки информации. Они способны ответить на современные запросы практики — растущие требования к точности и оперативности информации в условиях интенсификации сельскохозяйственного производства.

Работы по внедрению цифровых технологий в производство показывают качественное снижение стоимости и повышение скорости картирования в условиях сокращения возможностей получения новых полевых материалов (MacMillan et al., 2008). При этом решается вопрос объективного контроля точности и содержательного анализа почвенно-ландшафтных связей. Цифровые технологии позволяют ставить и решать задачи, ранее не имевшие технологического решения. Принципиально новой представляется возможность упорядочить почвообразующие факторы по степени их участия в формировании региональной неоднородности почвенного покрова (Пузаченко и др.,

2006; Козлов, 2009; Пузаченко, 2009). Становится доступным получение картографических отображений оценок достоверности результатов картографирования в рамках использованной технологии и априорных наборов данных (Козлов, 2009). Новые возможности находят спрос в обеспечении систем точного и ландшафтно-адаптивного земледелия, почвенно-экологического мониторинга и прогноза агрогенной и техногенной деградации почв и почвенного покрова.

Трансформация (обновление) технологии традиционного визуально-экспертного тематического картографирования происходит по нескольким направлениям:

1. Геоинформационная инвентаризация природно-ресурсной информации на разных уровнях обобщения (Рожков, Рожкова, 1993; Столбовой, 1993; Савин, 1999, 2003, 2004; Руководство ..., 2008 и др.). Включает в себя: 1) создание электронных баз данных первичных полевых опробований; 2) согласование разнотипных пространственно распределенных данных; 3) адаптация и внедрение геоинформационных технологий в традиционный процесс экспертно-визуального картографирования; 4) визуализация и тиражирование пространственной информации.

2. Дистанционное зондирование земной поверхности — совершенствование средств многозональной съемки и ее приложения для оценки природных ресурсов (Симакова, Савин, 1998; Кравцова, 2005; Frohn, 1998; Tomppo et al., 2002 и др.).

3. Цифровая картография (ЦК) — производство тематических карт с использованием цифровых технологий на всех этапах исследования (Берлянт, 2006). Используя достижения двух других направлений в области подготовки и создания цифровых данных, ЦК делает акцент на формализации методов картографии, используемых в традиционных экспертных эмпирических моделях. Наибольшее развитие цифровые методы получили в картографическом моделировании рельефа (Shary et al., 2002; Advances in Digital Terrain Analysis, 2008; Florinsky, 2011), климата (New et al., 2002; Sheffield et al., 2006), экосистем (Frohn, 1998; Tomppo et al., 2002) и почвенной картографии (McBratney et al., 2003; Innovative techniques in soil survey, 2004; Digital soil mapping, 2007; Digital soil mapping with limited data, 2008; Сорокина, Козлов, 2009; Козлов, Конюшкова, 2009).

Проблемы крупномасштабной почвенной картографии

Цифровые методы определили качественно новый этап в развитии почвенной картографии. Вместе с тем сохраняется и пополняется ряд проблем теоретического, методического, технологического и организационного характера, с решением которых будет связан прогресс почвенной картографии в ближайшие десятилетия.

Проблемы теоретического плана связаны с дискретно-континуальным характером почвенного покрова как объекта картографирования.

Как в традиционной, так и в цифровой картографии, по содержанию и назначению все почвенные карты могут быть разделены на две группы — базовые и специальные (Фридланд, 1986). По объектам картографирования и методам составления также различаются две группы карт. Первая связана с научными и практическими задачами, требующими выделения на карте дискретных ареалов единиц генетической или прикладных классификаций почв. Вторая группа — «частные» карты отдельных свойств, предназначенные для решения задач узко практического назначения (обеспеченность элементами питания, оценка актуальной кислотности и щелочности, загрязнение тяжелыми металлами, засоление, влажность и температура почвы и др.). Они могут составляться на основе базовой почвенной карты путем интерпретации содержания выделенных на ней контуров, либо разрабатываться в качестве самостоятельных картографических произведений. В последнем случае они могут быть определены как «парциальные» (Горячкин, 2006), т.е. основанные на анализе частных характеристик почвы, в отрыве от целостного представления о почве.

Дискуссия о способах картографического отражения почв и почвенного покрова является традиционной для почвоведения. Еще в начале XX в. Г.Ф. Нефедов, критикуя метод В.В. Докучаева, предлагал составлять карты отдельных свойств почвы, таких как структура, цвет, мощность, содержание гумуса, механический состав, нанося их на карту способом изолиний, не составляя при этом карты определенных генетических форм почв (Нефедов, 1908). Одним из доводов в пользу такого подхода была невозможность отразить с требуемой детальностью варьирование почв в рамках существующей почвенной систематики.

С 30-х годов XX века (таблица 1) главным итоговым документом почвенного картографирования становится базовая почвенно-генетическая карта.

В дополнение к ней и на ее основе составляется ряд карт и картограмм, содержащих сведения о свойствах почв (кислотность, мощность гумусового горизонта и др.) и агротехнические рекомендации по использованию различных почв (Почвенная съемка, 1959; Общесоюзная инструкция ..., 1973).

Развитие русской почвенно-картографической школы второй половины XX века связано с концепцией структуры почвенного покрова — СПП (Фридланд, 1972), согласно которой на картах в виде дискретных ареалов отражаются типизированные почвенно-географические единицы разных уровней организации: элементарные почвенные ареалы (ЭПА), элементарные почвенные структуры (ЭПС), мезоСПП. Они составляют основу для различных специальных карт прикладной направленности: агроэкологических, мелиоративных, лесохозяйственных и других групп земель (Составление областных среднемасштабных карт... 1990, Методология составления..., 2006).

На стадии становления цифровой картографии вновь возникла проблема картографического представления почвенного покрова. Проявилась тенденция заменить базовую почвенно-генетическую карту серией карт отдельных почвенных свойств. Анализ публикаций последнего десятилетия показывает, что объектом цифровой почвенной картографии в подавляющем большинстве служат отдельные почвенные показатели, используемые в решении прикладных задач. Работы по составлению почвенных карт в традиционном понимании — с выделением картографических единиц (ареалов), соответствующих выделам (таксонам) почвенной классификации, не превышают 10% общего объема исследований (Grunwald, 2008).

Вместе с тем, следует ожидать восстановления паритета базовых и частных карт после снижения массовой увлеченности технологической стороной картографирования и преодоления существующих методических и технологических проблем ЦПК. Основаниями для такого вывода служат низкие прогнозные возможности «парциальных» карт, их краткосрочная актуальность, методические сложности экстраполяции и генерализации результатов от детального масштаба к крупному и от крупного к среднему.

Важная задача, стоящая перед почвоведо-картографами, — при переходе к широкому использованию современных технологий сохранить

Таблица 1. Этапы развития крупномасштабной почвенной картографии в России
(по Г.А. Шершуковой, 1971 с дополнениями)

Период	Преобладающий масштаб; содержание работ	Метод	Картографическая основа	Назначение, использование	Ключевые проблемы
1	2	3	4	5	6
1892-1914 гг.	10 верст-1 верста в дюбле. Первые полевые работы	Полевой сравнительно-географический, метод ключей	Хозяйственный контурный план	Агрономия, организация опытных станций	Отсутствие единого научного подхода, классификации и методов
1923-1932 гг.	1:50 000 (1:42 000) Первичное обследование с.-х предприятий	Полевой агрохимический (почвенно-агрономический), почвенно-геоморфологический	Хозяйственный контурный план, топографические карты масштаба 1:50 000	Землеустройство с.-х предприятий, характеристика географической сети опытных участков Д.Н. Прянишников	Отсутствие топографических основ, неразвистость классификации, особенно культурных почв
1932-1950 гг.	1:50 000 – Рекогносцировочные обследования 1:10 000- 1:25 000 Систематические съемки землепользований	Полевой почвенно-геоморфологический и почвенно-агрохимический методы съемки	Хозяйственный контурный план (1:10 000, 1:25 000), топографические карты (1:50 000)	Химизация с.-х, исследование почвенного покрова землепользований, агрохимические исследования	Характеристика окультуренности, эродированности; отсутствие картографических основ

1	2	3	4	5	6
1930-е гг. – начало 1990-х гг.	1:10 000- 1:25 000 Сплошные почвенные съемки земельныхпользований хозяйств с повторными турами обследований	Камерально-полевое почвенно-геоморфологический анализ топографических карт и ландшафтное дешифрирование аэрокосмических, метод ключей. Используются разработки диагностики и классификации почв СССР, методические руководства по почвенной съемке. Общесоюзная инструкция...1973 и др.	Аэроосмичные, космические снимки, топографические карты, ландшафтно-геоморфологические факторные основы	Районная организация территорий землепользования, обоснование севооборотов, агрохимических и мелиоративных мероприятий, с 60-х годов учет и агропроизводственная оценка земель	Систематика почв, разработка методов агрокосмического дешифрирования, агропроизводственная группировка почв и земель
С начала 1990х гг.	1:10 000- 1:25 000 Выборочные обследования хозяйств, объектов мелиорации, дорожного строительства и др. по инициативе заказчиков	Широкое использование методологии СПЗ. Камерально-полевое ландшафтно-типологическое картографирование и дешифрирование, метод ключей; модели почвенно-ландшафтных связей (Методология...2006)	Аэрокосмические снимки, топографические карты, ландшафтно-геоморфологические факторные основы	Агроэкологическая группировка и оценка земель для обоснования адаптивно-ландшафтного земледелия, почвенно-экологический мониторинг	Систематизация почвенных неоднородностей; создание региональных систем ландшафтной индикации; разработка агроэкологической типизации земель
С начала XXI в	ЦПК Пространственное разрешение 10-200 м с точностью до 10 ³ . Выборочные обследования	ГИС, GPS, дистанционное зондирование, геостатистика, вероятностно-статистическое моделирование	ЦМР, многозональные снимки	Инвентаризация, оценка и мониторинг агроэкологических ресурсов; расширение спектра научных практических задач в сфере почвоведения и смежных дисциплин.	Неопределенность картографирования, неполнота и несогласованность исходных данных, повышенные требования к решению научно-практических задач.

накопленные знания об объекте, методологию СПП и методические достижения «традиционной» картографии.

Основная методическая проблема почвенной картографии связана с невозможностью прямой инвентаризации ареалов почв и почвенных комбинаций. Закономерности их пространственной организации выявляются по доступным для наблюдения свойствам факторов дифференциации ПП: рельефа, климата, почвообразующих пород, живых организмов, хозяйственной деятельности, пространственного положения. Крупномасштабные почвенные карты, в отличие от мелкомасштабных и среднемасштабных, составляются непосредственно по результатам наземных исследований. Поэтому специфические методические и технологические проблемы крупномасштабной почвенной картографии заключаются в переходе от точечной информации об отдельных почвенных разрезах к почвенным ареалам различного содержания. Это задача остается неизменной от периода становления крупномасштабной почвенной картографии в начале XX в. до современного этапа.

В цифровой почвенной картографии для интерполяции результатов точечного опробования распространены два взаимодополняющих подхода (McBratney et al., 2003). Первый основан на модели территориальной автокорреляции (геостатистики или пространственной статистики), второй — на модели почвенно-ландшафтных связей. Согласно первому подходу, значение моделируемого свойства почвы (S) в конкретной точке (x, y) может быть предсказано (интерполировано) на основе автокорреляционной функции, учитывающей значения этого свойства в некоторой окрестности ($x+u, y+v$) этой точки.

$$S(x, y) = f((x, y), s(x+u, y+v))$$

Геостатистическое моделирование требует высокой плотности полевого опробования. Это делает экономически нецелесообразным его использование при детальном картографировании больших территорий. Помимо этого, предполагается стационарность пространственного распределения результатов опробования, что накладывает существенные ограничения при картировании неоднородного почвенного покрова. Вместе с тем использование данного подхода оправдано для отображения специальных почвенных показателей в пределах агропроизводственных участков, не имеющих выраженных почвенно-ландшафтных связей (например, содержание в гумусовом

горизонте элементов биофильной группы). Параметры автокорреляционной функции используются для определения характерных масштабов пространственного варьирования почвенного покрова и выявления средних размеров почвенного индивидуума (Козловский, 1970; Геостатистика и география почв, 2007; Кузякова, 2006; Самсонова, 2008).

Технологическую основу цифровой модели почвенно-ландшафтных связей (второй подход) составляет растровая модель измерения факторно-индикационных характеристик, имеющих сплошной охват территории картографирования (рисунок 2).

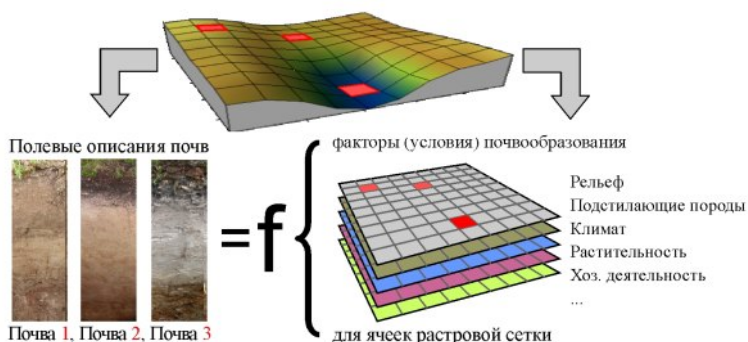


Рис. 2. Принципиальная схема цифрового почвенного картографирования на основе факторно-корреляционной модели почвенно-ландшафтных связей
(Приложение 1 на цветной вкладке)

Элементы регулярной сетки (пиксели, операционные или элементарные территориальные единицы — ЭТЕ) с обоснованными линейными размерами служат посредниками между точечными данными полевых почвенных описаний и площадными ландшафтно-индикационными характеристиками. Элементы, в пределах которых имеются почвенные описания, определяют обучающую выборку, на которой строятся вероятностно-статистические модели, связывающие изменчивость почвенных свойств, выявленную в ходе опробования, с изменчивостью свойств факторов почвообразования. В случае достоверности такой модели становится возможным предсказать значение моделируемого почвенного свойства для не обеспеченных полевым опробованием пикселей и дать оценку точности такого прогноза. Строго детерминированные модели допускают однозначное соответствие почвы определенному сочетанию почвообразующих факторов; модели на базе нечеткой

логики позволяют получить вероятностную оценку для каждой почвенной категории (McBratney, Odeh, 1997; Zhu et al., 2001, 2003).

В качестве средств построения ландшафтно-индикационной модели используются методы множественной регрессии, дискриминантного и корреляционного анализов, их модификации, позволяющие вычислить вес каждой индикационной переменной в разделении заданных почвенных категорий и сопоставить каждому сочетанию факторных основ определенное состояние почвы (Environmental soil-landscape modeling, 2006). Методы интеллектуального анализа данных (англ. *data mining*: нейронные сети, классификационные и регрессионные деревья и др.) обеспечивают выявление скрытых закономерностей или взаимосвязей в больших массивах данных.

В качестве факторно-индикационных характеристик элементов растровой сетки чаще всего используются значения абсолютных высот и производные морфометрические параметры рельефа, описывающие перераспределение влаги и тепла — показатели крутизны и формы поверхности, водосборная площадь, высота над местным базисом эрозии и др. (Шарый, 2005; Terrain Analysis..., 2000; Advances in Digital Terrain Analysis, 2008). Для характеристики растительности, особенностей хозяйственной деятельности как почвообразующих факторов используются многозональные оптико-электронные космические снимки различных систем (Landsat, Spot, Aster и др.), регистрирующих свойства ландшафтного покрова (биомасса, продуктивность, температура и др.) в величинах отраженного коротковолнового и собственного длинноволнового излучения (Кравцова, 2005; Ormeci, Ekerinc, 2008). В зависимости от особенностей территории и ее изученности набор базовых факторов может быть расширен характеристиками геолого-геоморфологических условий (почвообразующие породы, геологическое строение), гидрологического стока и др. Для средне- и мелкомасштабного картографирования используются среднеемесячные и среднегодовые климатические переменные, с пространственным разрешением 0.1° , 0.25° , 0.5° и 1° (New et al., 2002; Sheffield et al., 2006).

Несмотря на технологическую возможность параметризации свойств любых факторов почвообразования, в практике ЦПК широко распространено использование неполных двух-, трехкомпонентных моделей почвенно-ландшафтных связей, например, почва — рельеф, почва — рельеф, растительность (Grunwald, 2008; Innovative techniques in soil survey, 2004; Digital

soil mapping, 2007; Digital soil mapping with limited data, 2008). Использование таких «парциальных» моделей — удобный методический прием для освоения количественных методов анализа многокомпонентных систем на основе наиболее доступных для наблюдения факторов. Невысокие значения формальных показателей точности отображения свойств почвы и почвенного покрова в таких моделях заставляют расширять состав ландшафтно-индикационной модели.

Цифровое картографирование структуры почвенного покрова

Отображение структуры почвенного покрова в крупном масштабе, как при традиционном, так и при цифровом картографировании связано с решением двух методических задач: 1) построением вероятностной модели почвенно-ландшафтных связей; 2) типизацией почвенных комбинаций (Сорокина, 1998, 2005; Методология..., 2006). Для цифровой картографии это — принципиально новая задача, находящаяся в стадии разработки (Сорокина, Козлов, 2009; Козлов, 2009). До сих пор ареалы почвенных классов выделяются только по доминирующей почве, с применением нечетких множеств (Zhu et al., 2004).

При шаге растровой сетки, превышающем средние размеры ЭПА, практически в каждом пикселе будет фиксироваться сочетание почв разных категорий. Для выявления и типизации таких сочетаний используется аппарат нечеткой логики (рисунок 3). Функция принадлежности нечеткого множества принимает значения в интервале от 0 до 1 в зависимости от состояния факторов почвообразования (Burrough, 1989; Qi et al., 2006; McBratney, Odeh, 1997; Zhu et al., 1996). На рисунке 3а почва в пикселе 1 с вероятностью близкой к 1 будет принадлежать подтипу дерново-подзолистых почв (Пд) и с вероятностью 0 — дерново-подзолистым глееватым (Пдг), почва в пикселе 2 — наоборот. Почва в пикселе 3 с равной вероятностью может принадлежать им обоим. С позиций СПП такие области можно интерпретировать как места формирования комбинаций двух (или более) почвенных категорий. Для них указывается не наиболее вероятная почва, а порядок их сочетания. Прогноз будет справедлив лишь для области интерполяции (пиксели 1-3 обучаемой выборки).

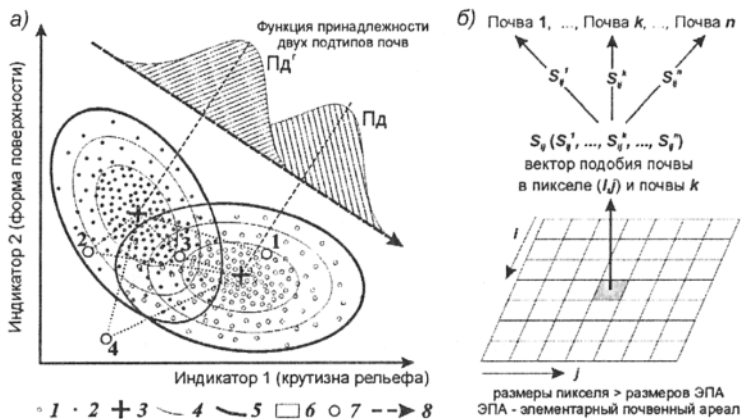


Рис. 3. Графическая интерпретация приложения нечеткой логики к задачам почвенной картографии: а) Положение почвенных категорий в пространстве индикационных характеристик рельефа. Точки почвенного опробования (обучающая выборка): 1 – Пд, 2 – Пд'; 3 – средние значения индикационных характеристик каждого подтипа почвы (М); 4 – область значений $M \pm \sigma$, $M \pm 2\sigma$, $M \pm 3\sigma$ (σ – стандартное отклонение); 5 – границы области интерполяции индикационного пространства; 6 – область формирования комбинаций Пд и Пд' почв; 7 – пиксели обучаемой выборки (№ 1-4, см. текст); 8 – фактор дифференциации двух типов почв (дренируемость позиции рельефа). б) Вектор подобия почвы в пикселе (i,j) и почвы k

Значения факторов почвообразования вне территории полевого почвенного опробования (пиксель 4), образуют области, для которых прогноз почвы некорректен. Степень принадлежности (подобия) почвы в пикселе (i,j) и почвенной категории k (S_{ij}^k) образуют n-мерный вектор $S_{ij}(S_{ij}^1, \dots, S_{ij}^k \dots S_{ij}^n)$, где n — число почвенных категорий (рис. 3б, Qi et. al, 2006). Анализ вектора подобия позволяет получить для каждой ЭТЕ: 1) наиболее вероятную почвенную категорию; 2) неопределенность однозначного прогноза, как максимальное значение S_{ij}^k из всех возможных, 3) типы сочетаний наиболее вероятной (преобладающей) почвенной категории с двумя-тремя сопутствующими. Изображение наиболее вероятной почвенной категории показывает ареалы преобладающей почвы (или градации почвенного свойства), а изображение типов сочетаний преобладающих и сопутствующих категорий почвы — ареалы почвенных комбинаций (ПК), образованных этими категориями.

Типизация ПК может проводиться в соответствии с существующими нормативами процентного состава компонентов ПП, либо путем формальной классификации операционных единиц по значениям вектора подобия. В по-

следнем случае дробность классификации (число классов) определяется по величине общей неопределенности отнесения элемента классификации к каждому классу (Minasny, McBratney, 2002). Картосхемы неопределенности прогноза преобладающей почвы и типизации почвенных комбинаций демонстрируют пространственную изменчивость детерминированности почвенно-индикационных связей и локализуют участки с комплексным ПП, требующие дополнительного почвенного опробования.

На рисунке 4 представлена принципиальная схема последовательности цифрового почвенного картографирования с отражением ПК. При переходе к цифровым методам общая схема картографирования сохраняется, но ряд методических задач получает новые решения (таблица 3).

Таблица 3. Сравнение традиционных и цифровых методов составления крупномасштабных почвенных карт в методологии СПП

Содержание работ	Без ЦПК	С ЦПК
Схема (алгоритм) картографирования	Принципиально та же: интерполяция точек почвенного опробования методами ландшафтной индикации	
Оперативная единица диагностики ПП	Ареалы факторных основ	Элементы растровой сетки
Учет уровней организации ПП	Сопоставление ЭПС, выделенных на ключах, с масштабными уровнями организации рельефа и аэрофотосъемки	Подбор размеров ячейки (пикселя) с учетом размеров ЭПА-ЭПС
Набор факторов индикаторов	Типы фотоизображений, качественная группировка элементов и форм рельефа, почвообразующих пород	Расширенный состав морфометрических характеристик рельефа, спектральных индексов аэрокосмической съемки
Метод группировки факторов-индикаторов	Экспертная группировка	Интерактивная оптимизация количественными методами информационного анализа
Типизация ПК	Экспертным методом до анализа почвенно-ландшафтных связей по материалам ключевых исследований	Использование методов нечеткой логики после построения модели почвенно-ландшафтных связей
Оценка надежности карты	1. Определялась нормативами почвенной съемки; 2. По вероятностной модели почвенно-ландшафтных связей (Методология, 2006)	Возможность оценки достоверности карты для каждого пикселя

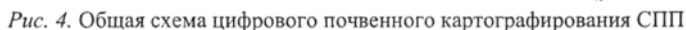


Таблица 4. Методические и технологические ограничения ЦПК

Проблемы	Возможные решения
Характерное пространство почвенно-ландшафтных связей	Обоснование оптимального размера ячеек растра с учетом средних размеров уровней организации ПП, выявленных при полевых обследованиях на детальных ключах и трансектах
Неполнота учета почвообразующих факторов и масштаба их проявления	Оценка веса почвообразующих факторов, не имеющих картографического отображения
Необходимость контроля полноты и представительности обучающей выборки	1) регулярная сеть почвенного опробования, 2) регулирование числа и положения точек на основе факторных основ
Нелинейный характер почвенно-ландшафтных связей	Адаптивные средства анализа, в том числе экспертные системы на основе баз знаний
Неточности источников пространственной информации и их совмещения в процессе анализа	Развитие средств сбора и координирования пространственно распределенной информации

48

полноту учета в картографической модели почвообразующих факторов и масштаба их проявления, 3) неполноту обучающей выборки, 4) нелинейный характер почвенно-ландшафтных связей, 5) зависимость от точности исходных данных и их преобразований при подготовке к анализу. Каждый источник ограничений приводит к снижению формальных показателей достоверности картографической модели.

Размер ячеек растровой сетки требует специального обоснования с учетом средних линейных размеров целевых единиц почвенной неоднородности участка картографирования. Рисунок 5 и таблица 5 дают общие придержки характерных уровней организации почвенного покрова и масштаба их отображения. Они требуют уточнения по региональной литературе и при полевых обследованиях на детальных ключах и трансектах.

В геоморфометрии, ландшафтоведении и ландшафтной экологии разрабатываются методы количественного анализа масштабных уровней организации земной поверхности (Пузаченко и др., 2002; *Advances in Digital Terrain Analysis*, 2008) и иерархии пространственных масштабов межкомпонентных связей (Хорошев, Алещенко, 2007; Wu et al., 2000). Фундаментальные вопросы данного направления связаны с выявлением и описанием характерных масштабов факторов морфолитогенеза, определения средних линейных размеров форм и элементов форм рельефа разного порядка и правил их соподчинения.

ЭЛЕМЕНТ ЛАНДШАФТА	ФАЦИЯ	ПОДУРОЧИЩЕ	УРОЧИЩЕ	ЛАНДШАФТ	
ЭЛЕМЕНТ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА					
МАСШТАБ	1:10 000	1:25 000	1:50 000	1:100 000	1:500 000
РАЗРЕШЕНИЕ	5 x 5 м	12.5x12.5 м	25x25 м	50x50 м	100x100 м
ЕДИНИЦЫ KST		почвенные серии	семейства подгруппы	макрогруппы	порядки
ЕДИНИЦЫ WRB			подгруппы	группы почв	

Рис. 5. Связь уровней организации ПП, масштаба и пространственного разрешения картографической модели (по Hengl, 2002, с дополнениями). Сокращения: WRB – World Reference Base for Soil Resources; KST – Keys to Soil Taxonomy

Таблица 5. Рекомендации пространственного разрешения (по MacBratney et al., 2003)

Масштабный уровень		масштаб карты	Разрешение раstra при размерах минимального контура			Охват, км
MacBratney	USDA		1x1 мм	2x2 мм	5x5 мм	
D1	0	> 1:5 000	< 5 м	< 10 м	< 25x25 м	< 50x50
D2	1, 2	1:5 000- 1:20 000	5 – 20 м	10 – 40 м	25x25 м – 100x100 м	5x5 – 200x200
D3	3, 4	1:20 000- 1:200 000	20-200 м	40-400 м	100x100 м – 1x1 км	20x20 – 2000x2000
D4	5	1:200 000- 1:200 0000	200 м – 2 км	400 м – 4 км	1x1 км – 10x10 км	200x200 – 20000x20000
D5	5	<1:2 000 000	> 2 км	> 4 км	> 10x10 км	>200x200

Практические аспекты нацелены на обоснование оптимального пространственного разрешения ЦМР и размеров локальной окрестности (скользящего квадрата), при которых достигаются наилучшие показатели связи свойств целевых объектов картографирования с их индикационными характеристиками (Hengl, 2006; Smith et al., 2006).

Оценка полноты картографической модели. Полнота учета в картографической модели почвообразующих факторов и масштаба их проявления поддается экспертной либо количественной оценке. В первую очередь должен оцениваться вес ландшафтно-индикационных характеристик, не имеющих картографического отображения, например, почвообразующих пород. Для территорий с мозаичными песчано-суглинистыми отложениями достоверная картографическая модель без характеристики их неоднородности построена быть не может. В случае двухчленных отложений требуется количественная оценка значимости мощности верхней толщи как фактора дифференциации почвенного покрова. Для характеристики условий почвообразования районов с однородными почвообразующими породами допустимо, при прочих равных условиях, ограничиться только переменными рельефа.

В рамках наиболее доступной для любых территорий информации ведется обоснование информативности различных морфометрических характеристик рельефа и методов их расчета (Florinsky, 1998; 2011; Shary et al., 2002). Продолжаются исследования селективности спектральных индексов

многозональных аэрокосмических снимков по отношению к различным свойствам отражательной поверхности, в том числе почвообразующих пород.

Во вторую очередь при оценке полноты картографической модели проверяется соответствие целевого уровня организации почвенного покрова и масштабных уровней его индикационных характеристик, в частности — форм и элементов форм рельефа разного порядка (Сорокина, 1980). Обычно микроструктуры СПП соответствуют элементам форм мезорельефа, воспроизводимых в масштабе 1 : 10 000. Параметризация ЦМР в более мелком масштабе приведет к подмене объекта картографирования, либо искажению ареалов микроструктур. Этот аспект проблемы характерных масштабов почвенно-ландшафтных связей требует специального обоснования, в том числе при полевых исследованиях СПП на ключах и трансектах.

Чем полнее и информативнее факторно-индикационная основа, тем меньшим количеством точек можно обойтись. Однако это не должно приводить к ее переоценке и недооценке первичной почвенной информации. Не в последнюю очередь из экономических соображений усиливается тенденция минимизации полевых работ и переноса центра тяжести при картографировании на методы индикации. Эта тенденция нуждается в обосновании и верификации (Ibanez, Zinck, 1994).

Репрезентативность обучающей и контролирующей выборки, должных корректно отражать состав и соотношение компонентов почвенного покрова, определяется использованием регулярной сети почвенного опробования с обоснованным шагом (Пузаченко и др., 2006), либо регулированием числа и положения точек по диапазону значений факторно-индикационных основ (Hengl, 2003, MacBratney et al., 2003).

Параметрическая основа наиболее доступных методов вероятностно-статистического анализа почвенно-ландшафтных связей ограничивает область их применения многомерными нормальными распределениями и линейными отношениями. Требуется поиск адаптированных средств вероятностно-статистического анализа. В рамках аппарата нечетких множеств решение этой методической проблемы связано с подбором адекватной функции принадлежности на массиве обучающей выборки, развитием методов интеллектуального анализа данных (нейронные сети, генетические алгоритмы и др.) и экспертных систем на основе баз знаний (Zhu et al., 2001).

Неточности источников пространственной информации и их размещения в процессе анализа связаны с 1) ошибками в первичных источниках ландшафтно-индикационной информации, 2) искажениями в процессе их геометрической и специальной обработки, 3) ошибками полевых описаний (диагностирование степени смытости и др.), 4) неточностями позиционирования точек описания относительно ЭТЕ. Практический опыт цифрового почвенного картографирования показывает, что основные затраты времени связаны с подготовкой исходных данных для анализа.

Заключая характеристику методических и технологических проблем ЦПК, отметим, что развитие новых технологий картографирования должно опираться на региональный материал, имеющий проработку в рамках существующих методик. Например, для этих целей удобны полигоны Почвенного института им. В.В. Докучаева РАСХН, целенаправленно созданные для изучения и картографирования СПП разных природных зон и обеспеченные кондиционными почвенно-картографическими материалами.

Организационные проблемы

Развитие ЦПК в мире и особенно нашей стране сдерживается организационной сложностью создания коллективов, объединяющих специалистов с высоким уровнем почвенной и математической подготовки. Роль экспертных знаний специалистов почвоведов и географов особенно велика в интерпретации результатов картографирования и объяснении механизмов дифференциации почвенного покрова конкретной территории. Формальные критерии точности математических моделей не исключают возможности комбинаторного решения, не имеющего отношения к реальным механизмам дифференциации географических явлений (Minasny, MacBratney, 2008). Результатом совместной работы творческих коллективов должны стать всесторонние методические руководства и специализированные программные средства, предназначенные для решения прикладных задач почвенной картографии. Например, в США с 2004 года действуют специализированные курсы по переподготовке почвенных картографов на базе программного обеспечения SoLIM Suite 1.5 (Zhu et al., 2003).

Другим ограничением быстрого распространения цифровых технологий является различная и не согласующаяся точность доступных материалов.

Национальные системы хранения и стандартизации почвенных описаний и разномасштабных почвенных карт существуют, либо активно разрабатываются в США, Канаде, Китае, Австралии, Нидерландах, Дании. В качестве главных проблем в систематизации существующих почвенных данных выступают несогласованность программ почвенных описаний как внутри отдельных стран, так и между ними; отсутствие точной координатной привязки точек описаний; различия в содержании и масштабах существующих почвенных карт. Для преодоления этих разногласий создаются международные программы (ISRIC-WISE, EIONET, EuDASM, e-SOTER, GlobalSoilMap.net и др.), призванные собрать в единой информационной системе все разнообразие существующих почвенных данных и способствовать разработке совместимых программ почвенного картографирования различного уровня.

Заключение

Приведенные сведения демонстрируют актуальное состояние и проблемы крупномасштабной почвенной картографии в эпоху широкого распространения цифровых методов. Вне их компетенции по-прежнему остаются такие принципиальные вопросы как объект (единица) картографирования, требования к качеству и содержанию почвенных карт, набору картографируемых показателей, их диагностике, детальности картографического представления.

Совершенствование карт на основе новых технологий необходимо сочетать с сохранением достижений традиционной картографии. Основной путь дальнейшего развития почвенной картографии — комбинирование и продуманное планирование последовательности использования традиционных методов и новых технологий.

Список литературы

- Берлянт А.М.* Картографический словарь. — М.: Научный мир, 2005. — 424 с.
- Геостатистика и география почв.* — М.: Наука, 2007. — 176 с.
- Горячкин С.В.* Проблема приоритетов в современных исследованиях почвенного покрова: структурно-информационный подход или парциальный анализ // *Современные естественные и антропогенные процессы в почвах и геосистемах.* — М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 53-81.

Козлов Д.Н. Цифровой анализ ландшафта в крупномасштабном картографировании структур почвенного покрова. Автореф...дисс. канд. геогр. н. М., 2009. 27 с.

Козлов Д.Н., Конюшкова М.В. Современное состояние и перспективы развития цифровой почвенной картографии (по материалам международного совещания, г. Логан, США, 2008 г.) // Почвоведение, 2009, №6. С. 750-753.

Козловский Ф.И. Почвенный индивидуум и методы его определения // Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. М.: Наука, 1970. С. 42-59.

Кравцова В.И. Космические методы исследования почв. М., 2005. 190 с.

Кузякова И.Ф. Концепция почвенного индивидуума в свете современных представлений о почвенной неоднородности // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах и геосистемах. – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. – С. 324-344.

Методика составления крупномасштабных почвенных карт с применением материалов аэрофотосъемки. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 114 с.

Методология составления крупномасштабных агроэкологически ориентированных почвенных карт. Составитель Н.П. Сорокина. – М.: Почвенный ин-т. им. В.В. Докучаева, 2006. – 150 с.

Нефедов Г.Ф. К методике почвенной картографии // Почвоведение, 1908, №4. С. 327-341.

Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований. М.: Колос, 1973. 96 с.

Почвенная съемка. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. 354 с.

Пузаченко М.Ю. Мультифункциональный ландшафтный анализ юго-запада Валдайской возвышенности. Автореф. дисс. канд. геогр. н. М., 2009. 24 с.

Пузаченко Ю.Г., Онуфрена И.А., Алещенко Г.М. Спектральный анализ иерархической организации рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр., 2002. №4. С. 29-38.

Пузаченко Ю.Г., Федяева М.В., Козлов Д.Н., Пузаченко М.Ю. Методологические основания отображения элементарных геосистемных процессов // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах и геосистемах. – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 13-52.

Рожков В.А., Рожкова С.В. Почвенная информатика. – М.: Изд-во Мос. ун-та, 1993. – 190 с.

Руководство по среднемасштабному картографированию почв на основе ГИС / М.С. Симакова, Д.И. Рухович, В.П. Белобров, Э.Н. Молчанов, Н.П. Чижилова, И.П. Гаврилова, М.И. Герасимова, М.Д. Богданова; под ред. М.С. Симаковой. – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. – 243 с.

Савин И.Ю. Анализ почвенных ресурсов на основе геоинформационных технологий: Автореф. дис. докт. геогр. наук. Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. М., 2004. 246 с.

Савин И.Ю. Инвентаризация почв с использованием ГИС-технологий // Почвоведение, 2003, № 10. – С. 1189-1196.

Савин И.Ю. Компьютерная инвентаризация почвенного покрова // Почвоведение, 1999, № 7. – С. 899-904.

Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв. 2008. 160 с.

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.

Сорокина Н.П. Принципы типизации почвенных комбинаций при изучении агрогенных изменений почвенного покрова // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1477-1488.

Сорокина Н.П. Региональная модель почвенно-ландшафтных связей (на примере Клинско-Дмитровской гряды) // Почвоведение, 1998, № 4. – С. 389-398.

Сорокина Н.П. Уровни организации рельефа и почвенного покрова южного склона Клинско-Дмитровской гряды и их отражение на почвенных картах // Картография почв и структура почвенного покрова. М., 1980. С. 65-80.

Сорокина Н.П., Козлов Д.Н. Опыт цифрового картографирования структуры почвенного покрова. Почвоведение. 2010, № 2. С 198-210.

Составление крупномасштабных почвенных карт с показом структуры почвенного покрова. Методические рекомендации / Составители: Шишов Л.Л., Сорокина Н.П., Панкова Е.И. / Редактор: Шишов Л.Л. – М: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева ВАСХНИЛ, 1989. – 56 с.

Столбовой В.С. Компьютерная картография почв. В сб.: География и картография почв. М., 1993, с. 291-301.

Фридланд В.М. Основные положения почвенной картографии // Проблемы географии, генезиса и классификации почв. – М.: Наука. 1986. – С. 119-137.

Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. – М.: Мысль, 1972. – 424 с.

Хорошев А.В., Алещенко Г.М. Характерное пространство межкомпонентных отношений в ландшафте // Вест. Моск. ун-та, сер. 5 геогр. 2007. № 1. – С. 22-28.

Шарый П.А. Оценка взаимосвязей рельеф-почва-растения с использованием новых подходов в геоморфометрии (на примере агроландшафта и лесной экосистемы юга Московской области) // Автореф..... дисс. канд. биол. наук. Тольятти, 2005.

Шершукowa Г.А. Этапы развития крупномасштабной картографии почв в СССР // Крупномасштабная картография почв – М.: Наука, 1971. – С. 144-166.

Advances in Digital Terrain Analysis / Zhou, Qiming; Lees, Brian; Tang, Guo-an (Eds.). 2008, XIV, – 462 p.

Burrough P.A., 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. Journal of Soil Science 40, 477–492.

Digital Soil Mapping: An introductory perspective / Eds.: P. Lagacherie, A.B. McBratney, M. Voltz. Amsterdam, Elsevier, 2007. – 600 p.

Digital Soil Mapping: Bridging Research, Production, and Environmental Application / Program and abstracts of the 3rd global workshop on digital soil mapping. 30 Sept. - 3 Oct., 2008. Utah State University, Logan, Utah, USA. 78 p.

Digital Soil Mapping with Limited Data / Eds.: A.E. Hartemink, A. McBratney, M.L. Mendonça-Santos. Springer, 2008. – 445 p.

Environmental soil-landscape modeling: geographic information technologies and pedometrics / edited by Sabine Grunwald. – CRC Press, 2006. – 488 p.

Florinsky I.V. Digital Terrain Modeling in Soil Science and Geology. 2011. Elsevier / Academic Press, Amsterdam, 379 p.

Florinsky I.V. Accuracy of land topographical variables derived from digital elevation models / International Journal of Geographic Information Science, 1998, №12. – P. 47–61.

Frohn R.C. Remote Sensing for Landscape Ecology: New Metric Indicators for Monitoring, Modeling, and Assessment of Ecosystems (Mapping Science). CRC-Press, 1998. 99 p.

Grunwald S. Multi-criteria assessment of digital soil modeling approaches // Digital Soil Mapping: Bridging Research, Production and Environmental Application. Program and abstracts of the 3rd global workshop on digital soil mapping. 30 September - 3 October, 2008. Utah State University, Logan, Utah, USA. P. 78.

Hengl T. Pedometric mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches // PhD Thesis, Wageningen University. ITC Dissertation No. 101, The Netherlands, 2003. – 214 pp.

Hengl T. Finding the right pixel size // Computers and Geosciences, 2006, 32(9). – P. 1283–1298.

Ibanez J.J., Zinck et al. Soil survey: old new challenges // Soil survey: perspectives strategies for the 21st century. ITC, Enchede, 1994. Pp. 7–14.

Innovative techniques in soil survey: Developing the foundation for a new generation of soil resource inventories and their utilization. Published by Land Development Chattuchak, Bangkok, Thailand, 2004.

MacMillan R.A., Moon D.E., Coupé R.A. Automated predictive ecological mapping in a Forest Region of B.C., Canada, 2001–2005 // Geoderma, 2008, Vol. 140, Issue 4. – P. 353–373.

McBratney A.B., Mendonca-Santos M.L., Minasny B. On digital soil mapping // Geoderma, 2003, Vol. 117, Issue 1–2. – P. 3–52.

McBratney A.B., Odeh I.O.A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. Geoderma, 1997, Vol. 77, 85–113.

Minasny B., McBratney A.B. Some experiments on using data mining techniques for digital soil mapping // Pedometron, Issue 25, December 2008. – Pp. 14–17.

New M., Lister D., Hulme M., Makin I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas // Climate Research, 2002, Vol. 21. – P. 1–25.

Ormecci C., Ekercin S. Use of real-time remote sensing data for evaluating soil moisture and salinity effects on light penetration depth // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B2. Beijing, 2008. p.167–173. URL http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/2_pdf/2_WG-II-2/01.pdf

Qi F., Zhu A.X., Harrower M., Burt J.E. Fuzzy soil mapping based on prototype category theory // Geoderma, 2006, №136. – P. 774–787.

Shary P.A., Sharay L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of and surface analysis // *Geoderma*, 2002, vol. 107. – P. 1-43.

Sheffield J., Goteti G., Wood E. Development of a 50-Year High-Resolution Global Dataset *Journal of Climate* (2006) Volume 19, Issue 13, Publisher: Boston, MA: American Meteorological Society. P. 3088-3111.

Smith M., Zhu A-Xing, Burt J.E., Stiles C. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey // *Geoderma*, 2006, № 137. P. 58-69.

Tomppo E., Czaplewski R., Mäkisara K. The role of remote sensing in global forest assessments. Forest Resource Assessment Programme // Working Paper 61. FAO. Rome 2002. URL <http://www.fao.org/docrep/006/ad650e/AD650E00.HTM>

Wu J., Qi Y. Dealing with scale in landscape analysis: An overview // *Geographic Information Sciences*, 2000, Vol. 6, №1. – P. 1-5.

Zhu A.X., Burt J.E. Moore A.C., Smith M.P., Liu J., Qi F. SoLIM: A New Technology For Soil Mapping Using GIS, Expert Knowledge & Fuzzy Logic. 2003. <http://solim.geography.wisc.edu/pubs/Overview2007-02-16.pdf>

Zhu A.X., Hudson B., Burt J., Lubich K., Simonson D. Soil Mapping Using GIS, Expert Knowledge, and Fuzzy Logic // *Soil Science Society of America Journal*. 2001, 65:1463–1472.