*ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2009, № 6, с. 56–65*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОЧВЫ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА (ПО ДАННЫМ КИНЕМАТИЧЕСКИХ GPS-СЪЕМОК И ПОЧВЕННЫХ НАЗЕМНЫХ СЪЕМОК)

**© 2009 г. И. В. Флоринский**

*Институт математических проблем биологии РАН, Пущино Московской области*

*E-mail: iflor@mail.ru*

Поступила в редакцию 08.12.2008 г.

В статье описан метод получения прогнозных карт физических, химических и биологических характеристик почвы. Метод основан на использовании цифровых моделей рельефа, полученных с помощью кинематической GPS-съемки, результатов наземных почвенных съемок и множественного регрессионного анализа. Возможности метода иллюстрируются на примере трех участков, расположенных в канадской провинции Манитоба. Показано, что воспроизводимость, простота и гибкость цифрового моделирования рельефа определяют его практический потенциал для решения задач прогнозного почвенного картографирования.

**Ключевые слова**: характеристики почвы, цифровое моделирование рельефа, GPS-съемка, картографирование почв.

## ВВЕДЕНИЕ

Кинематическая GPS-съемка (Global Positioning System) позволяет в реальном режиме времени создавать достаточно точные крупномасштабные и детальные цифровые модели высот (ЦМВ) (Clark, Lee, 1998; Schmidt et al., 2003). При этом используются спутниковая система глобального позиционирования и GPS-приемник, устанавливаемый на вездеходе. По мере движения вездехода в автоматизированном режиме производится регистрация трех координат каждой точки ЦМВ. Таким образом, данный метод топографической съемки является смешанной спутниково-наземной технологией.

Кинематическая GPS-съемка создает условия для оперативного и экономичного решения многих крупномасштабных задач в различных науках о Земле с использованием ЦМВ, там, где ранее эти решения замедлялись относительной трудоемкостью традиционных наземных топографических съемок (Baldi et al., 2000; Mills et al., 2003; Hamilton, Spikes, 2004). Прежде всего, это касается почвоведения (Erskine et al., 2007).

Рельеф земной поверхности является одним из факторов почвообразования. В отличие от других факторов этого процесса (климата, материнской породы, растительного покрова) и характеристик самой почвы, детальное и достаточно точное количественное описание рельефа, являющегося наиболее устойчивым во времени компонентом ландшафта, осуществляется относительно быстро и легко. Если для многих территорий сегодня существуют ЦМВ с разрешением 25 м, то аналогичные по детальности и покрытию количественные описания почвенных характеристик вряд ли появятся даже в долгосрочной перспективе. Это связано как с трудоемкостью почвенных съемок и лабораторных анализов, так и с тем, что для значительной части почвенных свойств характерна временна́я (например, сезонная) изменчивость.

В этой связи в почвоведении получило развитие прогнозное почвенное картографирование, основанное на допущении, что по относительно небольшой, но статистически репрезентативной выборке измерений некоторой почвенной характеристики можно восстановить поведение этой характеристики в пределах определенной территории – поля, ландшафта, небольшого водосборного бассейна (McBratney et al., 2003; Scull et al., 2003; Digital soil mapping..., 2007). Объектами прогнозного почвенного картографирования, как правило, являются морфологические, физические, химические и биологические свойства почвы. Наибольшее развитие получили три подхода, в той или иной степени связанные с цифровым моделированием рельефа: кригинг (Webster, Oliver, 1990; Odeh et al., 1995; Goovaerts, 1997), сегментация ландшафта (Pennock et al., 1987; MacMillan, Pettapiece, 1997) и множественный регрессионный анализ, в котором предикторами почвенных свойств выступают характеристики рельефа (Moore et al., 1993; Gessler et al., 1995).

Наличие статистической связи между почвенными и морфометрическими характеристиками

объясняется тем, что количественные характеристики рельефа влияют на ход и направленность многих естественных процессов (Moore et al., 1991; Florinsky, 1998; Shary et al., 2002). В частности, высокая корреляция той или иной почвенной характеристики с горизонтальной кривизной земной поверхности может говорить о том, что эта характеристика почвы зависит от степени конвергенции поверхностных и внутрипочвенных потоков влаги и растворенных или взвешенных в ней веществ, перемещающихся вдоль земной поверхности под действием силы тяжести. Значимая корреляция некоторой почвенной характеристики с вертикальной кривизной поверхности может свидетельствовать о том, что эта почвенная характеристика зависит от относительного замедления потоков вещества. Статистическая связь некоторой почвенной характеристики с удельной водосборной площадью может говорить о том, что на данную почвенную характеристику влияют процессы переноса вещества с вышележащих участков склона.

В данной статье впервые полностью описан один из методов прогнозного почвенного картографирования с использованием регрессионного анализа и цифровых моделей рельефа (ЦМР). Метод и его отдельные элементы неоднократно использовались автором для анализа, моделирования и прогнозного картографирования свойств почвы (Florinsky, Arlashina, 1998; Florinsky, Kuryakova, 2000; Farenhorst et al., 2003; Florinsky et al., 2002, 2004) и других компонентов ландшафта (Florinsky, Kuryakova, 1996), в том числе – с использованием данных дистанционного зондирования (Florinsky et al., 1994).

## МЕТОД ПРОГНОЗНОГО ПОЧВЕННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

Метод включает следующие этапы:

1) составление ЦМВ некоторого участка (поля). При этом может использоваться ЦМВ, полученная с помощью любой технологии – кинематической GPS-съемки, лидарной аэросъемки, традиционной наземной топографической съемки, и др. Выбор способа съемки определяет точность и разрешение получаемых ЦМР и последующих прогнозных почвенных карт, но не меняет последовательность процедур описываемого метода;

2) расчет на основе ЦМВ репрезентативного набора цифровых моделей морфометрических параметров. Рекомендуемый набор включает высоту ($z$), пятнадцать локальных параметров, а именно двенадцать кривизн поверхности (горизонтальную ($k_h$), вертикальную ($k_v$), среднюю ($H$), гауссову ($K$), минимальную ($k_{\min}$), максимальную ($k_{\max}$), аккумуляционную ($K_a$), разностную ($E$), кольцевую ($K_r$), избыточную вертикальную ($k_{ve}$), избыточную горизонтальную ($k_{he}$) и несферичность ($M$)), ротор ($rot$), крутизну ($G$) и экспозицию ($A$); два региональных параметра: водосборную ($CA$) и дисперсивную ($DA$) площадь; а также два комбинированных параметра: топографический индекс ($TI$) и индекс мощности потоков ($SI$). Определения, формулы и интерпретации этих параметров неоднократно публиковались ранее (Florinsky, 1998; Shary et al., 2002);

3) выделение в пределах участка делянки, которая репрезентативна относительно всего участка – с точки зрения распределения значений морфометрических параметров. Проверка морфометрической репрезентативности делянки относительно участка (достоверность различия) проводится с помощью известных статистических методов сравнения двух распределений;

4) отбор почвенных образцов на делянке;

5) множественный корреляционный и регрессионный анализ характеристик почвы и рельефа для выборок на делянке. Получение регрессионных уравнений почвенных характеристик, в которых предикторами являются характеристики рельефа;

6) расчет прогнозных карт характеристик почвы для всего участка на основе регрессионных уравнений, полученных для делянки.

С описанным методом связана процедура определения шага сетки ЦМР, адекватного для анализа и прогнозного картографирования свойств почвы (Florinsky, Kuryakova, 2000). Процедура включает:

– получение серии регулярных ЦМВ делянки с различным разрешением;

– расчет по этим ЦМВ моделей морфометрических характеристик;

– множественный корреляционный анализ характеристик почвы и рельефа в пределах делянки;

– графическое представление коэффициентов корреляции как функции разрешения ЦМР. Выположенные участки графиков идентифицируют адекватный шаг сетки ЦМР.

Существует несколько особенностей работы с морфометрическими параметрами:

1) $A$ является циркулярной величиной и ее значения изменяются от 0° до 360°, причем оба эти значения соответствуют направлению на север. Поэтому $A$ не может использоваться в линейном статистическом анализе. Для анализа статистических связей $A$ с другими величинами применяют либо подходы циркулярной статистики (Mardia, 1972), либо вместо $A$ используют $\sin A$ и $\cos A$ (King et al., 1999);

2) для многих почвенных и морфометрических параметров характерны статистические распределения, отличающиеся от нормального. Поэто-

му для оценки статистических связей между рельефом и характеристиками почвы корректно использовать ранговые коэффициенты корреляции (Webster, Oliver, 1990);

3) некоторые морфометрические параметры формально являются комбинациями других морфометрических параметров. *H* является комбинацией $k_h$ и $k_v$, а *TI* и *SI* – комбинациями *CA* и *G*. В этой связи одновременное использование $k_h$, $k_v$ и *H* или *CA*, *G* и *TI* в линейном регрессионном анализе некорректно;

4) динамический диапазон морфометрической характеристики на делянке часто бывает меньше динамического диапазона этой характеристики в пределах всего участка. Это характерно для *CA*, *DA*, *G* и *z*. Однако технически сложно выбрать делянку так, чтобы она полностью удовлетворяла динамическим диапазонам всех морфометрических величин на участке. В случае неполной репрезентативности делянки получаемые регрессионные уравнения нельзя использовать для прогноза характеристик почвы в зонах, где значения морфометрического предиктора существенно отличаются от его динамического диапазона в пределах делянки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Покажем применение описанного метода на примере трех участков, расположенных в канадской провинции Манитоба. Географические координаты участка № 1: 50°13′40″ с.ш., 100°51′20″ з.д.; географические координаты участков № 2 и 3 (расположены рядом): 50°14′43″ с.ш., 99°50′34″ з.д. Климат континентальный, рельеф равнинный, с большим числом мелких замкнутых заболоченных депрессий. Участки лежат в ландшафтной зоне северных степей. Преобладают черноземовидные почвы на ледниковых отложениях. Размеры участка № 1 составляют 809 × 820 м при амплитуде высот 6 м (рис. 1*а*); размеры участка № 2 – 1680 × 821 м при амплитуде высот 13 м (рис. 2*а*); размеры участка № 3 – 1678 × 712 м при амплитуде высот 18 м (рис. 3*а*). На всех участках выращиваются зерновые культуры и рапс.

Нерегулярные ЦМВ были получены с помощью кинематической GPS-съемки с использованием приемника Trimble 4600LS, установленного на вездеходе. ЦМВ включали 4211, 7193 и 6935 точек для участков № 1, 2 и 3 соответственно. На участках были выбраны репрезентативные делянки, в пределах которых проводился отбор почвенных образцов (рис. 1–3). Образцы отбирались в 210 точках на участке № 1, в 40 точках на участке № 2, и в 40 точках на участке № 3. Среди прочих параметров на участке № 1 измерялись влажность почвы в верхнем 30-см слое (Moist) и мощность солюма – совокупности генетических почвенных горизонтов *A* и *B* (Solum). На участке № 2 для пахотного горизонта почвы измерялись коэффициент сорбции (*Kd*) гербицида 2.4-Д ((2,4-дихлорфенокси) уксусная кислота), ферментативная активность арилсульфатазы (Arilsulf) и плотность почвы (BD). На участке № 3 для старопахотного горизонта почвы измерялись содержание органического углерода (SOC), pH и количество илистых частиц (Clay). Детальное физико-географическое описание участков, подробности топографической и почвенной съемки, а также лабораторного анализа почвенных образцов публиковались ранее (Bergstrom et al., 2000; Farenhorst et al., 2003; Florinsky et al., 2002, 2004).

После регуляризации ЦМВ с помощью гладкой интерполяции по ним были рассчитаны все рекомендованные выше морфометрические характеристики: с шагом 15 м для участка № 1 и с шагом 20 м для участков № 2 и 3 (рис. 1–3). Локальные морфометрические характеристики рассчитывались методом Эванса (Pennock et al., 1987), а региональные – методом Мартца–де Янга (Martz, de Jong, 1988).

Для оптимальной визуализации динамического диапазона морфометрических характеристик, при их картографировании обычно применяется логарифмическое трансформирование (рис. 1*б, д, е*, 2*г–е*, 3*г–е*):

$$T' = \operatorname{sign}(T)\ln(1 + 10^m|T|), \qquad (1)$$

где $T$ – значение морфометрической характеристики. При шаге сетки ЦМР от 10 до 100 м можно рекомендовать $m = 0$ для региональных характеристик, $m = 8$ для аккумуляционной, кольцевой и гауссовой кривизны и $m = 4$ для других характеристик (за исключением *TI*, в формулу которого входит натуральный логарифм). Такая форма трансформирования (Shary et al., 2002) позволяет корректно преобразовывать динамический диапазон характеристик рельефа, значения которых могут быть как положительными, так и отрицательными.

Был проведен множественный корреляционный и регрессионный анализ между указанными характеристиками почвы и морфометрическими показателями.

Цифровое моделирование рельефа и картографирование проведены с помощью программы LandLord (Флоринский и др., 1995). Статистический анализ проведен с помощью программы Statgraphics Plus 3.0 (© Statistical Graphics Corp., 1994–1997).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты множественного корреляционного и регрессионного анализа подробно описаны в работах (Farenhorst et al., 2003; Florinsky et al.,

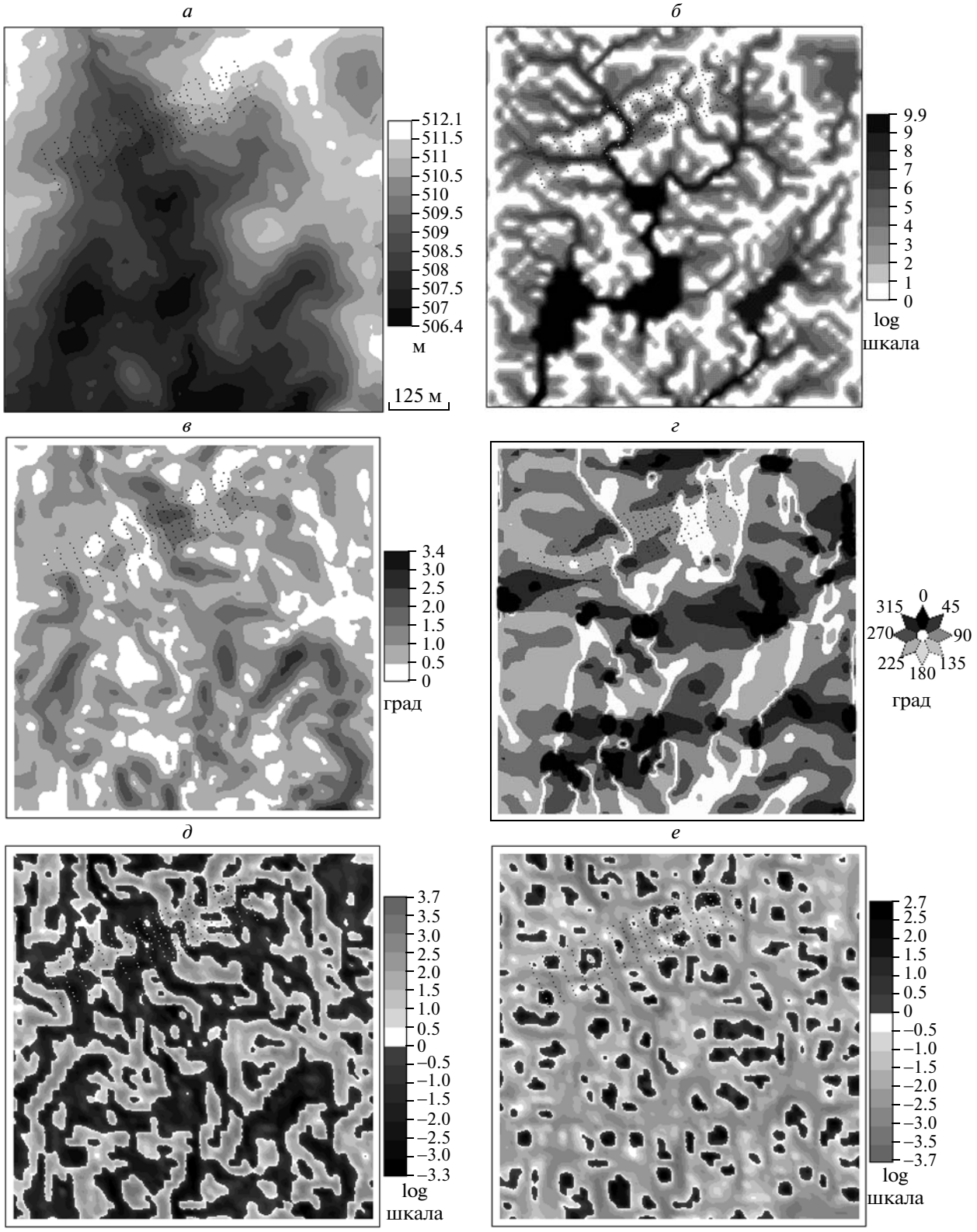


**Рис. 1.** Морфометрические карты участка № 1: *а* – высота; *б* – удельная водосборная площадь; *в* – крутизна склонов; *г* – экспозиция склонов; *д* – вертикальная кривизна; *е* – минимальная кривизна. Точками показаны места отбора почвенных образцов.

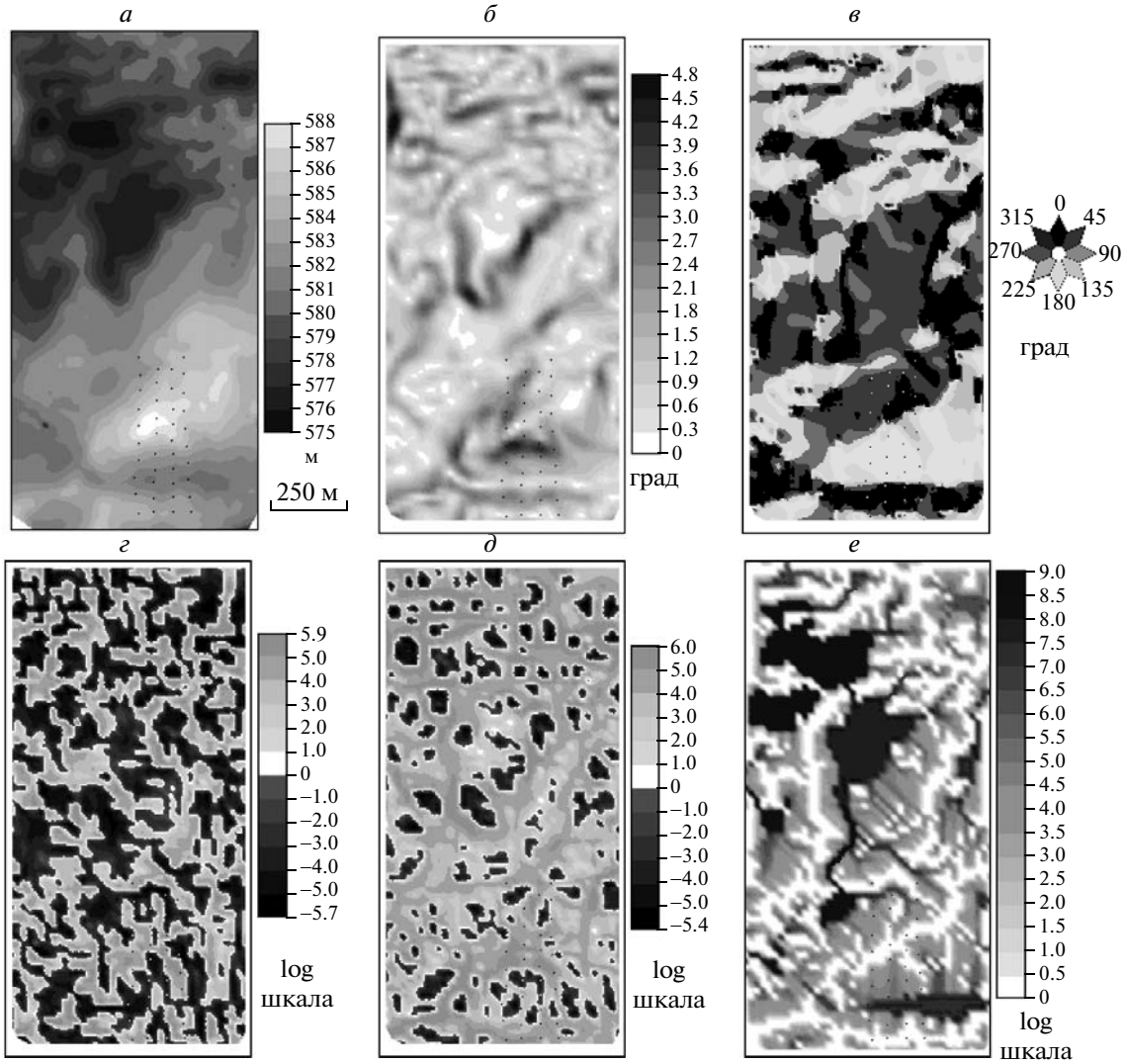


**Рис. 2.** Морфометрические карты участка № 2: *а* – высота; *б* – крутизна склонов; *в* – экспозиция склонов; *г* – горизонтальная кривизна; *д* – максимальная кривизна; *е* – удельная водосборная площадь. Точками показаны места отбора почвенных образцов.

2002, 2004). Ни для одной из рассматриваемых характеристик почвы не были найдены значимые корреляции с $k_{he}$, $k_{ve}$, $E$, $rot$, $DA$, $K_a$, $K_r$, $M$ и $K$. Между остальными морфометрическими параметрами – $z$, $G$, $A$, $k_h$, $k_v$, $H$, $k_{\min}$, $k_{\max}$, $CA$, $TI$ и $SI$ – и характеристиками почвы существуют значимые корреляции, абсолютные значения которых варьируют от 0.3 до 0.7 при уровне значимости 0.00. В данных природных условиях наиболее высокие корреляции отмечены для $G$, $k_v$, $H$ и $CA$ (таблица).

В результате множественного регрессионного анализа получены уравнения, описывающие зависимость характеристик почвы от параметров рельефа:

$$\mathrm{Moist} = 20.34 - 0.66z - 1.30G - 0.65\sin A - 1.87k_v + 1.41k_{\min} + 1.30\ln CA; \quad (2)$$

$$\mathrm{Solum} = 37.08 + 2.16z - 4.64G - 4.83k_v + 7.97\ln CA; \quad (3)$$

$$\mathrm{Kd} = 11.11 - 0.02z - 0.04G - 0.06\sin A - 0.65k_v - 0.68k_{\max}; \quad (4)$$

$$\mathrm{Arilsulf} = 69.88 - 0.12z - 0.07G + 1.12k_h + 0.18\ln CA; \quad (5)$$

$$\mathrm{BD} = 1.17 + 0.04G + 0.04\sin A + 0.03\cos A - 0.82k_h + 1.19k_{\max} - 0.05\ln CA; \quad (6)$$

$$\mathrm{SOC} = 68.14 - 0.11z - 0.23G; \quad (7)$$

$$\mathrm{pH} = 73.53 - 0.12z; \quad (8)$$

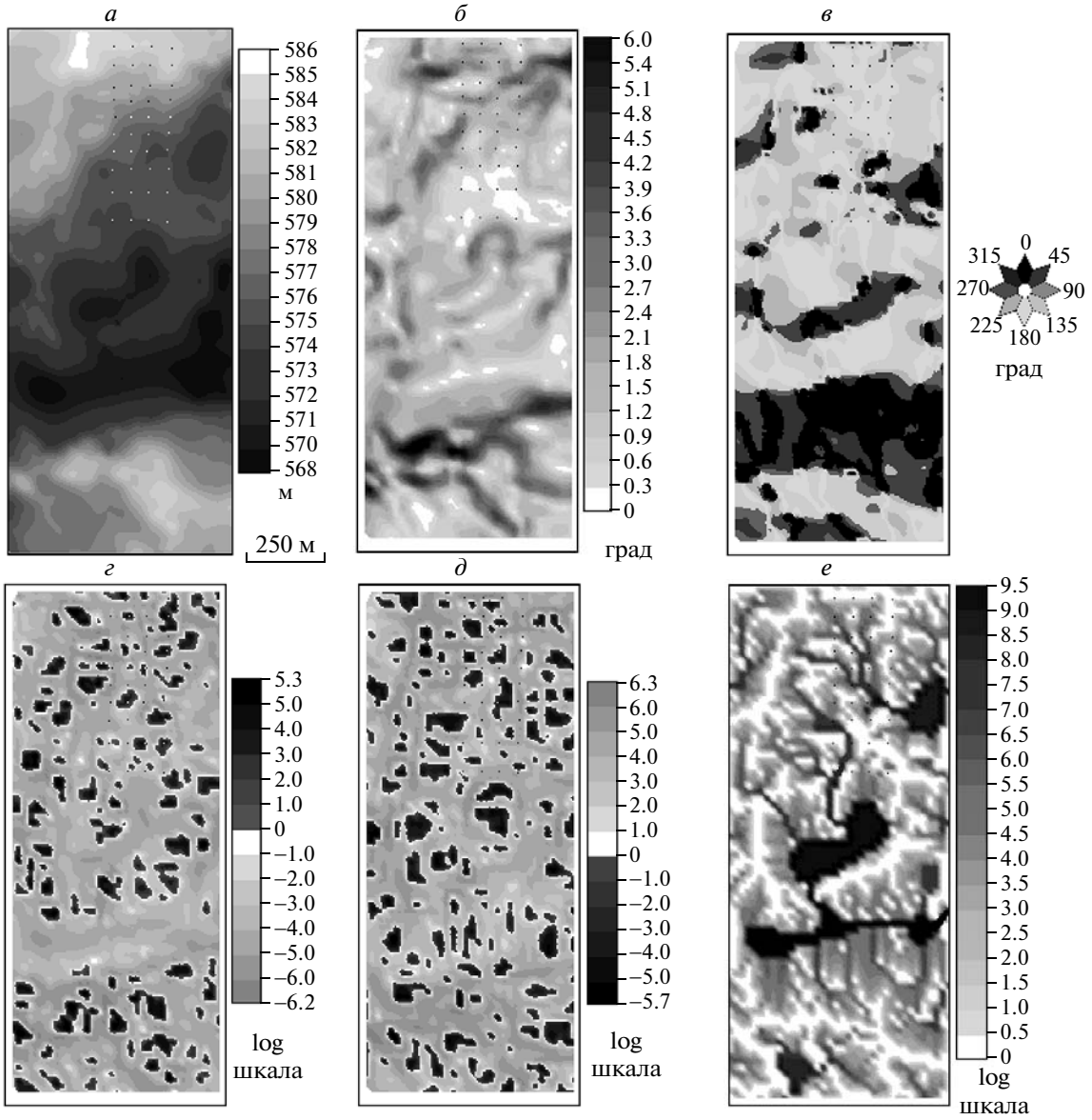


**Рис. 3.** Морфометрические карты участка № 3: *а* – высота; *б* – крутизна склонов; *в* – экспозиция склонов; *г* – минимальная кривизна; *д* – максимальная кривизна; *е* – удельная водосборная площадь. Точками показаны места отбора почвенных образцов.

$$\text{Clay} = 1035.67 - 1.75z + 3.05G - 3.98\sin A + \\ + 11.73\cos A + 53.06k_{\min} + 65.77k_{\max} + 6.45\ln CA. \quad (9)$$

Для участка № 1 полученные регрессионные уравнения объясняют 49% пространственной вариабельности влажности почвы в верхнем 30-см слое и 42% изменчивости мощности солюма. Для пахотного горизонта участка № 2 регрессионные уравнения объясняют 53% вариабельности коэффициента сорбции гербицида 2.4-Д, 63% вариабельности ферментативной активности арилсульфатазы и 65% вариабельности плотности почвы. Для старопахотного горизонта участка № 3 регрессионные уравнения объясняют 54% вариабельности содержания органического углерода, 53% вариабельности pH и 66% вариабельности количества илистых частиц. Так как в регрессионных уравнениях в качестве предикторов используются только морфометрические параметры, можно говорить о том, что характеристики рельефа контролируют приведенные выше доли пространственной вариабельности указанных характеристик почвы.

С помощью полученных регрессионных уравнений (2–9) и цифровых моделей морфометрических параметров (рис. 1–3), вошедших в эти уравнения в качестве предикторов, были получены

Ранговые коэффициенты корреляции между характеристиками почвы и морфометрическими параметрами (приведены только значимые коэффициенты при уровне значимости 0.00)

| Характеристика почвы | Морфометрические параметры | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $z$ | $G$ | $\sin A$ | $\cos A$ | $k_h$ | $k_v$ | $H$ | $k_{\min}$ | $k_{\max}$ | $CA$ | $TI$ | $SI$ |
| Влажность почвы в верхнем 30-см слое | –0.44 | –0.31 | – | 0.20 | –0.29 | –0.48 | –0.44 | –0.34 | –0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.42 |
| Мощность солюма | –0.19 | –0.26 | – | – | –0.49 | –0.44 | –0.53 | –0.47 | –0.50 | 0.54 | 0.55 | 0.51 |
| Коэффициент сорбции гербицида 2.4-Д | –0.51 | – | –0.34 | – | –0.32 | –0.59 | –0.61 | –0.38 | –0.60 | 0.44 | 0.61 | 0.39 |
| Ферментативная активность арилсульфатазы | – | – | – | – | – | –0.56 | –0.44 | – | –0.47 | 0.37 | 0.46 | – |
| Плотность почвы | 0.53 | 0.35 | – | – | – | 0.65 | 0.57 | 0.36 | 0.58 | –0.47 | –0.65 | –0.49 |
| Содержание органического углерода | –0.68 | –0.49 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| pH | –0.66 | – | – | – | – | – | – | – | – | –0.38 | – | – |
| Количество илистых частиц | –0.40 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |

прогнозные цифровые модели и карты характеристик почвы (рис. 4–6). Цифровые модели прогнозных значений почвенных характеристик включают по 2756 точек для участка № 1, по 3233 точки для участка № 2 и по 2751 точки для участка № 3. Рисунок прогнозных карт (рис. 4–6) в определенной степени отражает рисунок карт параметров рельефа (рис. 1–3). В зонах, где значения параметров-предикторов существенно отличается от диапазона значений этого предиктора на делянке, прогнозное картографирование не проводилось. Эти зоны показаны крапом (рис. 4–6). В качестве критерия точности полученных карт можно использовать коэффициенты детерминации регрессионных уравнений (2–9). Полученные регрессионные уравнения могут быть с определенной осторожностью использованы для получения прогнозных почвенных карт на участках с близкими геоморфологическими, гидрологическими и почвенными характеристиками.

Систематическое применение цифрового моделирования рельефа при почвенных исследованиях позволило получить ряд фундаментальных результатов. В частности, доказано, что пространственное распределение динамических свойств почвы зависит от рельефа, если содержание влаги в почве превышает пороговый уровень

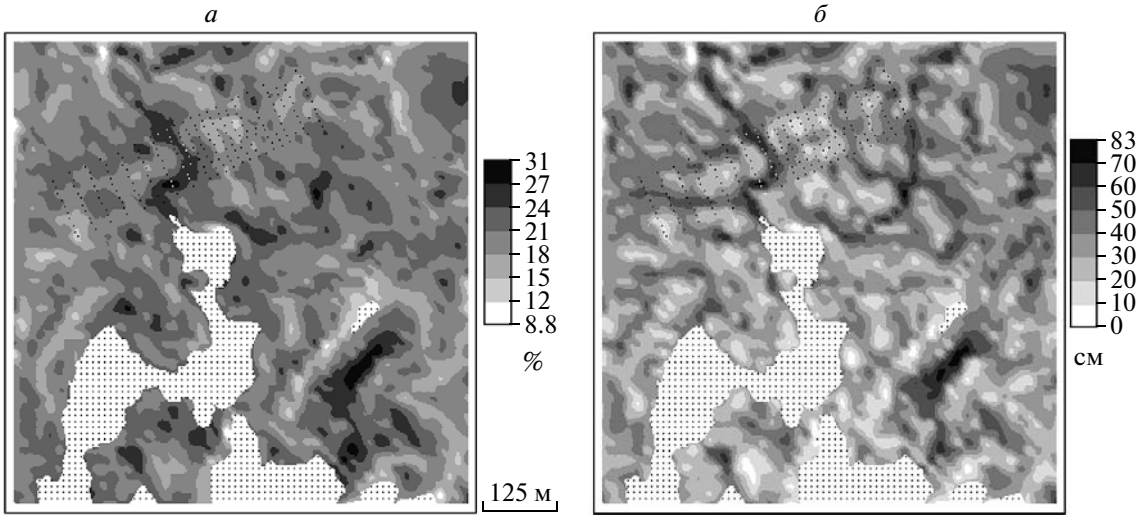


**Рис. 4.** Участок № 1, прогнозные карты характеристик почвы: *а* – влажность почвы в верхнем 30-см слое; *б* – мощность солюма. Крапом на белом фоне обозначены зоны, для которых прогнозные значения не рассчитывались, точками – места отбора почвенных образцов.

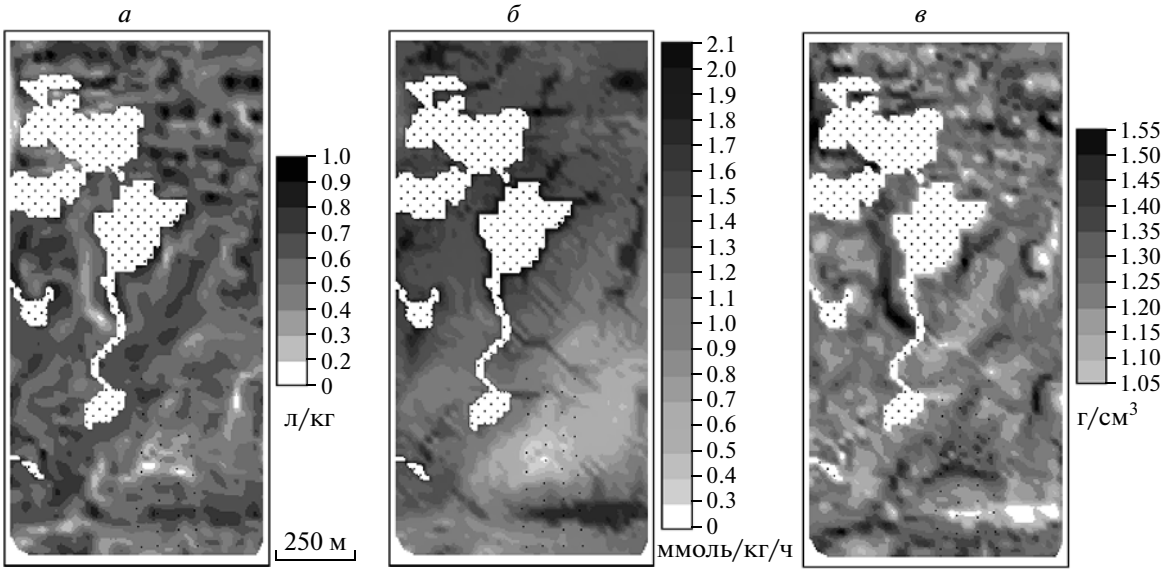


**Рис. 5.** Участок № 2, прогнозные карты характеристик почвы для пахотного горизонта: *а* – коэффициент сорбции гербицида 2.4-Д; *б* – ферментативная активность арилсульфатазы; *в* – плотность почвы. Крапом на белом фоне обозначены зоны, для которых прогнозные значения не рассчитывались, точками – места отбора почвенных образцов.

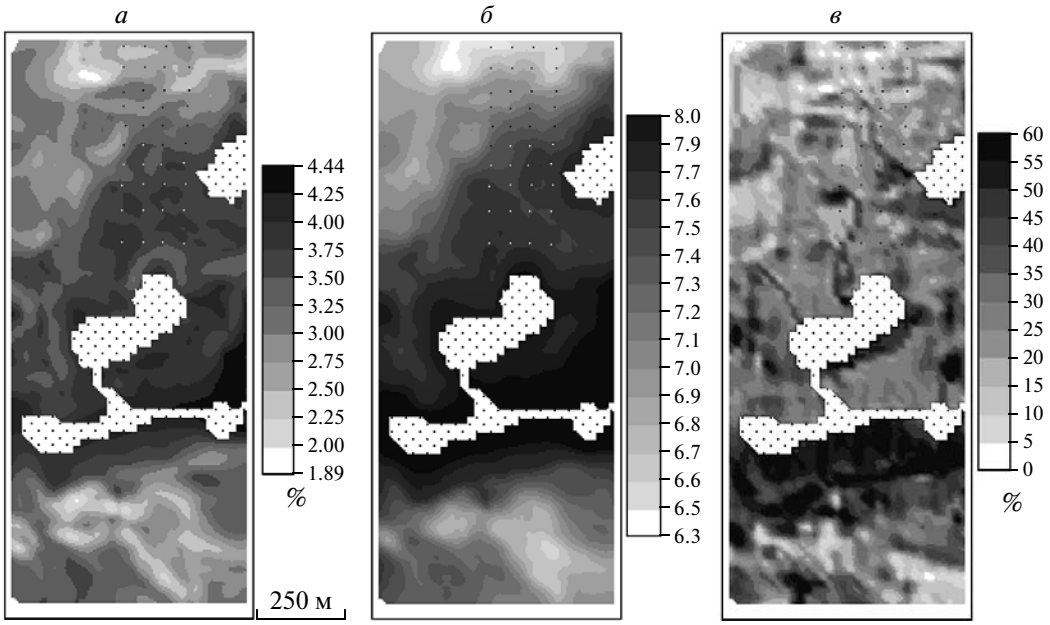


**Рис. 6.** Участок № 3, прогнозные карты характеристик почвы для старопахотного горизонта: *а* – содержание органического углерода; *б* – pH; *в* – количество илистых частиц. Крапом на белом фоне обозначены зоны, для которых прогнозные значения не рассчитывались, точками – места отбора почвенных образцов.

(Florinsky et al., 2004). Установлено, что зависимость динамических свойств почвы от рельефа уменьшается с глубиной почвенного профиля (Florinsky et al., 2002). Наиболее четко зависимость почвенных характеристик от рельефа проявляется на глубине 30 см. Кроме того, описана временна́я вариабельность зависимости пространственного распределения динамических свойств почвы от рельефа (Florinsky et al., 2002): в разные сезоны влияние рельефа на одну и ту же динамическую характеристику почвы описывается различными коэффициентами корреляции и регрессионными уравнениями. Это накладывает определенные ограничения на использование регрессионных уравнений при прогнозе пространственного распределения свойств почвы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ и прогноз пространственного распределения и динамики свойств почвы является важным элементом адекватного с.-х. использования почв и управления устойчивым развитием агроландшафта. Рельеф земной поверхности во многом определяет свойства почвенного покрова (Gerrard, 1981; Huggett, Cheesman, 2002). За последние два десятилетия разработан ряд эффективных алгоритмов расчета ЦМР (Shary, 2008; Florinsky, 2009), получила развитие физико-математическая теория топографической поверхности (Shary et al., 2002), а распространение кинематической GPS-съемки и лидарной аэросъемки сделало доступными крупномасштабные и детальные ЦМВ. Воспроизводимость, простота и гибкость методов ЦМР определяет их практический потенциал для прогнозного почвенного картографирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Флоринский И.В., Грохлина Т.И., Михайлова Н.Л.* LANDLORD 2.0: система анализа и картографирования геометрических характеристик рельефа // Геодезия и картография. 1995. № 5. С. 46–51.

*Baldi P., Bonvalot S., Briole P., Marsella M.* Digital photogrammetry and kinematic GPS applied to the monitoring of Vulcano Island, Aeolian Arc, Italy // Geophys. J. Int. 2000. V. 142. № 3. P. 801–811.

*Bergstrom D.W., Monreal C.M., Tomlin A.D., Miller J.J.* Interpretation of soil enzyme activities in a comparison of tillage practices along a topographic and textural gradient // Can. J. Soil Sci. 2000. V. 80. № 1. P. 71–79.

*Clark R.L., Lee R.* Development of topographic maps for precision farming with kinematic GPS // Trans. ASAE. 1998. V. 41. № 4. P. 909–916.

Digital soil mapping. An introductory perspective / Eds. Lagacherie P., McBratney A., Voltz M. Amsterdam: Elsevier, 2007. 600 p.

*Erskine R.H., Green T.R., Ramirez J.A., MacDonald L.H.* Digital elevation accuracy and grid cell size: effects on estimated terrain attributes // Soil Sci. Soc. Am. J. 2007. V. 71. № 4. P. 1371–1380.

*Farenhorst A., Florinsky I.V., Monreal C.M., Muc D.* Evaluating the use of digital terrain modeling for quantifying the spatial variability of 2.4-D sorption by soil within agricultural landscapes // Can. J. Soil Sci. 2003. V. 83. № 5. P. 557–563.

*Florinsky I.V.* Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations // Progr. Phys. Geogr. 1998. V. 22. № 1. P. 33–60.

*Florinsky I.V.* Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation model // Int. J. Geogr. Inform. Sci. 2009. V. 23. № 2. P. 213–231.

*Florinsky I.V., Arlashina H.A.* Quantitative topographic analysis of gilgai soil morphology // Geoderma. 1998. V. 82. № 4. P. 359–380.

*Florinsky I.V., Eilers R.G., Manning G., Fuller L.G.* Prediction of soil properties by digital terrain modelling // Environ. Model. Software. 2002. V. 17. № 3. P. 295–311.

*Florinsky I.V., Kulagina T.B., Meshalkina J.L.* Influence of topography on landscape radiation temperature distribution // Int. J. Rem. Sens. 1994. V. 15. № 16. P. 3147–3153.

*Florinsky I.V., Kuryakova G.A.* Influence of topography on some vegetation cover properties // Catena. 1996. V. 27. № 2. P. 123–141.

*Florinsky I.V., Kuryakova G.A.* Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations – exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale // Int. J. Geogr.l Inform. Sci. 2000. V. 14. № 8. P. 815–832.

*Florinsky I.V., McMahon S., Burton D.L.* Topographic control of soil microbial activity: a case study of denitrifiers // Geoderma. 2004. V. 119. № 1–2. P. 33–53.

*Gerrard A.J.* Soils and landforms. An integration of geomorphology and pedology. L.: George Allen and Unwin, 1981. 219 p.

*Gessler P.E., Moore I.D., McKenzie N.J., Ryan P.J.* Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes // Int. J. Geogr. Inform. Sci. 1995. V. 9. № 4. P. 421–432.

*Goovaerts P.* Geostatistics for natural resources evaluation. N.Y.: Oxford University Press, 1997. 483 p.

*Hamilton G.S., Spikes V.B.* Evaluating a satellite altimeter-derived digital elevation model of Antarctica using precision kinematic GPS profiling // Global and Planetary Change. 2004. V. 42. № 1–4. P. 17–30.

*Huggett R.J., Cheesman J.* Topography and the environment. Harlow: Pearson Education, 2002. 274 p.

*King D., Bourennane H., Isambert M., Macaire J.J.* Relationship of the presence of a non-calcareous clay-loam horizon to DEM attributes in a gently sloping area // Geoderma. 1999. V. 89. № 1–2. P. 95–111.

*MacMillan R.A., Pettapiece W.W.* Soil landscape models: automated landscape characterization and generation of soil-landscape models. Technical bulletin № 1997-1E. Lethbridge: Agriculture and Agri-Food Canada, 1997. 75 p.

*Mardia K.V.* Statistics of directional data. L.: Academic Press, 1972. 357 p.

*Martz L.W., de Jong E.* CATCH: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models // Comput. Geosci. 1988. V. 14. № 5. P. 627–640.

*McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B.* On digital soil mapping // Geoderma. 2003. V. 117. № 1–2. P. 3–52.

*Mills J.P., Buckley S.J., Mitchell H.L.* Synergistic fusion of GPS and photogrammetrically generated elevation models // Photogramm. Eng. Rem. Sens. 2003. V. 69. № 4. P. 341–349.

*Moore I.D., Gessler P.E., Nielsen G.A., Peterson G.A.* Soil attribute prediction using terrain analysis // Soil Sci. Soc. Am. J. 1993. V. 57. № 2. P. 443–452.

*Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R.* Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications // Hydrol. Proc. 1991. V. 5. № 1. P. 3–30.

*Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J.* Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging // Geoderma. 1995. V. 67. № 3–4. P. 215–226.

*Pennock D.J., Zebarth B.J., de Jong E.* Landform classification and soil distribution in hummocky terrain,

Saskatchewan, Canada // Geoderma. 1987. V. 40. № 3–4. P. 297–315.

*Schmidt J.P., Taylor R.K., Gehl R.J.* Developing topographic maps using a sub-meter accuracy global positioning receiver // Appl. Eng. Agr. 2003. V. 19. № 3. P. 291–302.

*Scull P., Franklin J., Chadwick O.A., McArthur D.* Predictive soil mapping: a review // Progr. Phys. Geogr. 2003. V. 27. № 2. P. 171–197.

*Shary P.A.* Models of topography // Advances in Digital Terrain Analysis / Eds. Zhou Q., Lees B., Tang G. B.: Springer, 2008. P. 29–57.

*Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. V. 107. № 1–2. P. 1–32.

*Webster R., Oliver M.A.* Statistical methods in soil and land resource survey. N.Y.: Oxford University Press, 1990. 316 p.

# Soil Mapping Based on Digital Terrain Modeling (Using Data from Kinematic GPS Surveys and Soil Surveys)

**I. V. Florinsky**

*Institute of Mathematical Problems of Biology, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow District*

The author describes a method to derive predictive maps of physical, chemical, and biological properties of soil. The method is based on multiple regression analysis of digital terrain models obtained by kinematic GPS survey and of soil survey data. Possibilities of the method are exemplified by three sites located in Manitoba, Canada. Reproducibility, simplicity, and flexibility of digital terrain modeling determine its practical potentiality to solve problems of predictive soil mapping.

**Key words**: soil properties, digital terrain models, GPS survey, soil mapping.