УДК 631.4, 910.27, 528

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАСШТАБНЫХ УРОВНЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЛЬЕФА ПАШНИ

© 2019 г. Н. В. Минаев^{1*}, А. А. Никитин^{2**}, Д. Н. Козлов^{3***}

¹РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия, 127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49 * https://orcid.org/0000-0003-0718-3383, e-mail: Arjuna@yandex.ru

²Сколковский институт науки и технологий, Россия, 143026, Москва, ул. Нобеля, 3, ** <u>https://orcid.org/0000-0003-3563-3388</u>,

e-mail: artem.nikitin@skolkovotech.ru

³Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2 *** <u>https://orcid.org/0000-0003-0103-0300</u>, e-mail: <u>kozlov_dn@esoil.ru</u>

Поступила в редакцию 02.11.2018, после доработки 02.11.2018, принята к публикации 12.03.2019

В задачах почвенной картографии важную роль играет выявление факторно-индикационных характеристик, обладающих высокой информативностью обзорностью И относительно организации почвенного покрова. В детальном и крупном масштабах этими свойствами обладают материалы съемки с беспилотных летательных аппаратов, включающие спектрозональные изображения и цифровую модель высот местности сверхвысокого пространственного разрешения. Однако в условиях пашни агрогенный нано- и микрорельеф выступает в качестве шума при изучении топографической дифференциации почвенного покрова, поскольку генетические свойства почв связаны с микро- и мезорельефом естественного происхождения. В статье предлагается алгоритм фильтрации неровностей земной поверхности, не связанных с пространственной организацией целевых почвенных свойств. На примере цифровой модели рельефа поля площадью 125 га (Владимирское ополье) демонстрируются этапы идентификации линейных размеров структур рельефа гляциального и агрогенного происхождения на основе двухмерного разложения Фурье. Фильтрация в частотной области позволила восстановить естественный рельеф поля и обосновать эффективное разрешение цифровой модели рельефа и окрестности для расчета локальных морфометрических размеры характеристик рельефа в целях цифровой почвенной картографии.

3

Ключевые слова: геоморфометрия, цифровая модель рельефа, БПЛАсъемка, Фурье анализ, Владимирское ополье.

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-96-3-21

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технических средств сбора пространственно распределенной информации о факторах почвообразования расширяет возможности почвенной картографии (Minasny, McBratney, 2016). В масштабе 1 : 10 000 и крупнее применение средств спутникового позиционирования, лазерной геодезии, аэрокосмического и подповерхностного зондирования позволяют на порядок увеличить охват почвенной съемки при сохранении ее детальности. Это приводит к повышению площади выявления организации почвенного покрова и обзорности детальных почвенных карт (Gruijter et al., 2016; Guenette, Hernandez-Ramirez, 2018; Eltnera et al., 2018; Brogi et al., 2019).

К числу перспективных технических средств относятся беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оборудованные системами дистанционной съемки земной поверхности (Савин, 2015; Eltnera et al., 2018). Помимо высокодетального спектрозонального изображения наземного покрова (1 м и детальнее) фотограмметрическая обработка снимков позволяет получить цифровую модель высот местности. Эти согласованные продукты БПЛАсъемки составляют базовую основу почвенного картирования, поскольку рельеф традиционно рассматривается в качестве ведущего фактора дифференциации почвенного покрова на локальном уровне, а дистанционное изображение - как индикатор его неоднородности. Однако, как и любая технология, использование БПЛА для задач почвенного картографирования требует методического обоснования. Активно исследуются вопросы точности цифровых моделей местности, полученных при разных условиях полета БПЛА и режимах съемки (Шинкевич и др., 2015), алгоритмы фотограмметрической обработки материалов БПЛА-съемки и фильтрации цифровой модели местности для подавления шумов (Akar, 2017; Ruzgiene et al., 2015; Zeybeka Şanlıoğlu, 2019), использования разновременной БПЛА-съемки при мониторинге природных процессов (Eltner et al., 2014; Woodget et al., 2015), состояния

посевов и продуктивности почв (<u>Савин, 2015</u>; <u>Capolupo et al.</u>, <u>2015</u>).

В данной статье предлагается алгоритм идентификации масштабных уровней организации земной поверхности на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) отдельного поля. В условиях пашни поверхность поля представляет собой совокупность неровностей разного пространственного размера и генезиса (Eltnera et al., 2018). Так нанорельеф (до 1 м) есть результат механической обработки почвы (глыбы, гребни, борозды и т.п.), микрорельеф (1-10 м) – результат долговременной агрогенной трансформации рельефа (свальные гребни и развальные борозды) и естественных экзогенных процессов (суффозионные и термокарстовые западины, ложбины, эрозионные борозды и др.), мезорельеф (10-100 м) формы ледникового, водноледникового, эрозионного генезиса. При общей очевидности представлений о масштабных уровнях организации рельефа их идентификация в конкретных региональных условиях сопряжена с существенной неопределенностью (Пузаченко и др., 2002). Важность формализации выделения масштабных уровней проявляется в задачах моделирования почвенноландшафтных связей и автоматизированного составления почвенных карт.

Действительно, агрогенный нано- и микрорельеф, являясь активным фактором по отношению к современным элементарным почвенным процессам, не информативен в отношении объяснения пространственного варьирования продуктов почвообразования с длительным временем формирования (строение профиля, новообразования и др.). Пространственная изменчивость подобных консервативных свойств почв предопределена микро- и мезорельефом естественного происхождения.

В связи с этим методическое обоснование приемов идентификации масштабных уровней рельефа разного генезиса на основе данных БПЛА-съемки актуально для изучения пространственного разнообразия почвенного покрова и его картографирования. Именно этому посвящена данная статья.

5

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Работа проведена на ключевом участке пашни бывшего учхоза РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева "Дружба" Переславского района Ярославской области. Территория относится к северным отрогам Клинско-Дмитровской гряды и представляет собой средне- и слаборасчлененную пологоволнистую вторичную моренную равнину с чехлом покровных суглинков мощностью более 2 м. В структуре почвенного покрова широкое участие принимают почвы со вторым гумусовым горизонтом, приуроченные к отрицательным элементам палеокриогенного и флювиального микрорельефа (Рубцова, 1974; Макеев, Дубровина, 1990; Алифанов, Гугалинская, 1993). Эти региональные особенности почвенно-ландшафтных связей определяют интерес к идентификации при детальной почвенной съемке именно микроформ рельефа.

На участке площадью 125 га проведена съемка с БПЛА Геоскан-201 Агро (Россия). Облет проведен в конце мая в солнечный и ясный день, когда поверхность почвы была открыта. Съемка с высоты 200 м выполнена в четырех каналах с использованием RGB и NIR камер с разрешением 5 см на местности. Высокая точность координатной привязки каждого снимка обеспечена использованием дифференцированной системы спутникового позиционирования в составе базовой станции Stonex SIII+ и приемника Торсоп В110 на борту БПЛА. Автоматическая сшивка сцен облета и фотограмметрические работы выполнены в программе PhotoScan¹. Первичный материал цифровой фотограмметрии стереопар снимков представлен облаком точек относительных высот с плотностью 4 точки на 1 м². Облако точек маскировано по границам поля для исключения высотных отметок растительности. Интерполяция высотных отметок земной поверхности для сетки 0.25 м проведена методом ординарного кригинга в программе SAGA.

При общем перепаде высот 29 м рельеф поля (рис. 1) включает субгоризонтальную поверхность и пологие склоны северной и южной экспозиции (элементы мезорельефа моренного проис-

¹ Программное обеспечение AgiSoft PhotoScan Professional, версия 1.3.4 – <u>http://www.agisoft.com/downloads/installer/</u>

хождения). Они осложнены линейными формами разного размера и генезиса. Ориентированные вниз по склону ложбины имеют флювиальное происхождение (Еременко, Панин, 2010) и отождествляются с формами микрорельефа. В субширотном направлении выражены вытянутые нано- и микроформы амплитудой 10–30 см, генетически связанные с механической обработкой почвы.



Рис. 1. Цифровая модель рельефа поля с квадратной областью спектрального анализа.

При изучении топографической дифференциации почвенного покрова агрогенный рельеф выступает в качестве шума. Простые фильтрационные алгоритмы в скользящем окне не подавляют его полностью, что определило использование для этой цели методов спектрального анализа (<u>Пузаченко и др., 2002</u>; <u>Turcott,</u> <u>1992</u>; Wieland, Dalchow, 2009</u>).

Спектральный анализ осуществляет разложение пространственных колебаний абсолютных или относительных высот рельефа по частотам и определение величины амплитуды, приходящейся на каждую частоту. Получаемая амплитудно-частотная характеристика позволяет определить период устойчивых простран-

ственных колебаний высот различных форм рельефа и их повторяющихся сочетаний. Обратное преобразование Фурье в соответствующем диапазоне линейных размеров пространственных волн позволяет построить поверхности для каждого масштабного уровня организации рельефа как по отдельности, так и в произвольном сочетании (Котлов, Пузаченко, 2006; Wieland, Dalchow, 2009).

Спектральная фильтрация включает четыре шага:

1. Прямое дискретное преобразование Фурье (Дэвис, 1990) области ЦМР размером $M \times N$ пикселей (рис. 1).

$$F_{kl} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} Z_{mn} \left(\cos 2\pi \left(\frac{mk}{M} + \frac{nl}{N} \right) - j \cdot \sin 2\pi \left(\frac{mk}{M} + \frac{nl}{N} \right) \right),$$

где F_{kl} – амплитуды гармонических колебаний, k и l – номера гармоник в направлении X и Y вплоть до M/2 и N/2 соответственно, Z_{mn} – значения высот в соответствующих ячейках ЦМР, j – мнимая единица. Двухмерный спектр содержит амплитуды гармонических колебаний разной длины и направления (рис. 2a). Наглядное представление амплитудночастотной характеристики дает радиальная свертка двухмерного спектра (<u>Turcott</u>, 1992; <u>Пузаченко и др.</u>, 2002) осреднением амплитуд колебаний с одинаковым периодом (рис. 26).

2. Анализ амплитудно-частотного образа рельефа для идентификации масштабных уровней его организации. Их число определяется количеством прямолинейных участков на графике зависимости частоты (D) и амплитуды S(D) гармонических колебаний спектрального разложения (рис. 2б). Для диапазона линейных размеров самоподобных форм рельефа выполняется степенная зависимость $S(D) = \alpha * D^{\beta}$, принимающая линейную форму в логарифмической шкале переменных. Интервалы линейных размеров масштабных уровней задает диапазон периодов колебаний между перегибами линейных участков графика. Для повышения наглядности поиск линейных участков проводят после удаления линейного тренда. Для определения параметра самоподобия β участок спектра аппроксимируется линейной функцией методом наименьших квадратов (Захаров, 2014). Чем больше значение β , тем пред-

сказуемее изменяется высота при малых приращениях координат. При $\beta = 0$ высоты от пикселя к пикселю меняются случайно, при $\beta = 2$ – постепенно.

3. Генерация частотного фильтра $H_{k,l}$ для частот, соответствующих диапазону $[D_{B,q,.},..,D_{H,q}]$:

$$H_{k,l} = \begin{cases} 1, & \text{если } D_{\text{в.ч.}} \leq D_{k,l} \leq D_{\text{н.ч.}} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases},$$
$$D_{k,l} = \sqrt{\left(\frac{k}{M} - \frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{l}{N} - \frac{1}{2}\right)^2},$$

и его применение к частотной области ЦМР

$$G_{k,l} = F_{k,l} \cdot H_{k,l} \; .$$

4. Обратное преобразование Фурье для построения поверхности целевого масштабного уровня организации рельефа:

$$Z_{mn} = \sum_{k=0}^{M-1N-1} \sum_{l=0}^{M} \left(\frac{G_{kl}}{MN} \right) \left(\cos 2\pi \left(\frac{mk}{M} + \frac{nl}{N} \right) + j \cdot \sin 2\pi \left(\frac{mk}{M} + \frac{nl}{N} \right) \right).$$

Спектральный анализ выполнен для квадратного фрагмента ЦМР размером 1640 × 1640 пикселей (820 × 820 м), расположенного в центре поля (рис. 1). Требование Фурье-разложения на периодичность исходного сигнала обеспечено последовательным зеркальным отражением квадратного фрагмента ЦМР относительно его двух перпендикулярных сторон (рис. 2а). В этом случае исключается появление в мощности спектра ложных гармоник Фурье-разложения, описывающих скачкообразное изменение высоты на краях ЦМР. Прямое и обратное преобразование Фурье, а также фильтрация в частотной области выполнены в программе ImageJ 1.52c (Fiji).

Помимо определения параметров фильтрации результаты спектрального анализа используются для обоснования эффективного разрешения ЦМР и размеров окрестности вычисления локальных морфометрических характеристик рельефа (Advanced..., 2008). Геометрические свойства элементов форм рельефа с длиной λ определяются при размерах скользящего окна $\lambda/2$ (Florinskiy, 2016). Линейные размеры характерных форм рельефа (Пузаченко

<u>и др., 2002; Котлов, Пузаченко, 2006</u>) определяют по пикам графика мощности спектра (рис. 2г).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

График зависимости мощности спектра от периода колебаний (рис. 2в) демонстрирует возрастание амплитуды колебаний высот при увеличении их размеров. После удаления тренда график остатков от линии регрессии (рис. 2в) показывает наличие трех интервалов с линейной зависимостью между размерами и амплитудой колебаний рельефа.

Интервалы соответствуют размерам самоподобных структур рельефа, порождаемых независимыми факторами (Ведюшкин, 1995; Пузаченко и др., 2002; Захаров, 2014). Рельеф I порядка имеет характерные размеры более 27 м с общим перепадом высот 22 м и стандартным отклонением 6.5 м. На участке исследования он отождествляется с формами ледниковой дегляциации и перигляциального морфогенеза (рис. 3а). Агрогенные структуры рельефа II порядка включают свальные гребни и развальные борозды, образованные многократной вспашкой почвы плугом с нарушением очередности проходов загонов. Они имеют размеры от 4 до 27 м и перепад высот до 1 м. Структуры рельефа III порядка с размерами менее 4 м и перепадом высот до 30 см также имеют агрогенное происхождение, однако их амплитудно-частотная характеристика искажена фотограмметрической обработкой и интерполяцией высотных отметок.

Таким образом, в организации рельефа исследуемого поля целесообразно выделять две группы самоподобных морфологических элементов природного и агрогенного происхождения с масштабной границей между ними в частотной области 27 м. Обратное преобразование Фурье в соответствующем диапазоне пространственных волн позволило построить поверхности разного генезиса и восстановить рельеф поля без неровностей, порожденных механической обработкой почвы (рис. 3а).

Дополнительную информацию дает анализ спектра рельефа І порядка в диапазоне от 27 до 1640 м (рис. 2г). На фоне общей линейной зависимости амплитуды и размеров пространственных волн выражены характерные размеры 410, 120, 60 м (рис. 2г).



Рис. 2. Этапы спектрального разложения: а) исходная модель рельефа (1640 × 1640 пикселей, разрешение 0.5 м); б) двухмерный Фурье-спектр; в) радиальная свертка двухмерного спектра с тремя масштабными уровнями организации рельефа I–II–III порядка; г) характерные размеры форм рельефа I порядка.

Для идентификации их морфометрических особенностей в задачах цифровой почвенной картографии размеры локальной окрестности должны составлять соответственно 200, 60 и 30 м при разрешении цифровой модели рельефа 20 м.

В качестве примера на рисунке 3 приведен результат расчета топографического индекса превышений в окрестности 200 м и 30 м (рис. 3в и 3г). Индекс рассчитывается для каждого элемента цифровой модели рельефа как разница между его высотой и средней высотой элементов, удаленных от него на фиксированное рас-

стояние (Weiss, 2001). Показатель характеризует форму поверхности и широко используется в геоморфометрии (De Reu et al., 2013).



Рис. 3. Масштабные уровни организации рельефа поля: а) поверхность I порядка; б) поверхность II и III порядков; относительные превышения поверхности I порядка в окрестности в) 200 м; г) 30 м.

Относительные превышения в окрестности 200 м и 30 м наглядно иллюстрируют самоподобие структур рельефа I порядка разного размера. Чередование повышений и понижений округлой и овальной формы (рис. 3в, 3г) образует однородный рисунок, инвариантный относительно масштаба. Вместе с тем он отражает особенности разномасштабного перераспределения стока как ведущего механизма функционирования почвенного покрова в ареале гумидного почвообразования. При прочих равных условиях соотношение рассеивающих/концентрирующих сток элементов рельефа определяет строение водно-миграционных структур поч-

венного покрова на разных уровнях его организации. В данном случае дифференциация элементарных почвенных ареалов потенциально сопряжена с перераспределением стока по формам рельефа с характерными размерами 60 м, а элементарных почвенных структур – по формам рельефа с характерными размерами 410 м.

Сравнение рисунков 36 и 3г показывает, что Фурьефильтрация не обеспечивает полного разделения поверхностей разного генезиса. Отфильтрованный компонент (рис. 36) помимо агрогенного микрорельефа содержит формы естественного происхождения, повторяющиеся в структуре рельефа I порядка со сглаженными очертаниями (рис. 3г). Это подчеркивает известную условность разделения в ситуации, когда формы свальноразвального микрорельефа соразмерны формам западинноложбинной сети. В данном случае Фурье-фильтрация не исключает микроформы естественного происхождения из ЦМР поля, а лишь сглаживает перепады их высот.

Агрогенное замещение естественного микрорельефа сопровождается увеличением его контрастности. Чередование свальных гряд и развальных борозд с перепадом высот 20–30 см каждые 15– 25 м формирует специфичный микрорельеф с особым рисунком (рис. 3г). В сравнении с рельефом I порядка его амплитудночастотная характеристика отличается большим вкладом в мощность спектра высокочастотных колебаний (рис. 2в). Коэффициент самоподобия спектра в диапазоне 4–27 м ($\beta = 0.6$) в три раза меньше, чем в диапазоне 27–1640 м ($\beta = 1.5$). Низкие значения коэффициента самоподобия говорят о нерегулярности размещения агрогенных форм в пределах поля, невыдержанности их размеров и асимметрии.

Появление массовых материалов детальной топографической съемки выявило широкое участие свально-развального микрорельефа в организации поверхности пашни. Являясь следствием нарушений технологий вспашки (Кирюшин, 2016), агрогенный рельеф выступает локальным фактором перераспределения стока, изменяет водный режим почв и интенсивность связанных с ним процессов гумификации и минерализации органического вещества, элювиирования, оглеения и др. В свою очередь, это ведет к

трансформации почв и почвенного покрова, увеличению агроэкологической мозаичности поля, неоднородности развития посевов.

В этой связи представленные подходы к фильтрации масштабно-генетических уровней организации рельефа поля могут использоваться не только для целей цифровой почвенной картографии, но и для организации исследований процессов агрогенной трансформации почв и почвенного покрова, а также для оценки агроэкологической контрастности микрорельефа поля при проектировании интенсивных и высоких технологий его возделывания.

выводы

1. За счет детального масштаба и обзорности материалы БПЛА-съемки обладают высокой информативностью в отношении фактического разнообразия поверхности пашни, испытывающей агрогенное замещение естественного микрорельефа. Агрогенный свально-развальный микрорельеф выступает в качестве шума при изучении топографической дифференциации компонентов почвенного покрова. Одновременно он является активным фактором трансформации свойств почв и почвенного покрова поля и формирования неоднородности его агроэкологических условий.

2. Идентификация масштабных уровней организации поверхности пашни на основе Фурье-фильтрации ЦМР поля позволяет восстановить его естественный рельеф и обосновать размеры окрестности для расчета локальных морфометрических характеристик рельефа в целях цифровой почвенной картографии.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН "Теоретические и экспериментальные исследования для эффективного научнотехнологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов В.М., Гугалинская Л.А. Палеокриогенез и структура почвенного покрова Русской равнины // Почвоведение. 1993. № 7. С. 65–75.

2. Ведюшкин М.А. О фрактальном подходе к описанию пространственной структуры растительных сообществ // Проблемы мониторинга и моделирования динамики лесных экосистем. М.: Изд-во АО "Журнал Экос-информ", 1995. С. 182–201.

3. Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. Т. 2. М.: Недра, 1990. 427 с.

4. Еременко Е.А., Панин А.В. Ложбинный мезорельеф Восточно-Европейской равнины: монография. М.: МИРОС, 2010. 192 с.

5. Захаров В.С. Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа: Дис. ... д. геол.минерал. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2014. 281 с.

6. Кирюшин В.И., Кирюшин С.В. Агротехнологии. СПб.: Изд-во Лань, 2015. 464 с.

7. Котлов И.П., Пузаченко Ю.Г. Структура рельефа Русской равнины как ландшафтообразующего фактора. Ландшафтное планирование: общие основания. Методология, технология / Тр. междунар. шк-конф. "Ландшафтное планирование". М.: Изд-во Геогр. фак. МГУ, 2006. С. 166–172.

8. *Макеев А.О., Дубровина И.В.* География, генезис и эволюция почв Владимирского ополья // Почвоведение. 1990. № 7. С. 5–26.

9. Пузаченко Ю.Г., Онуфреня И.А., Алещенко Г.М. Анализ иерархической организации рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 4. С. 29–38.

10.*Рубцова Л.П.* О генезисе почв Владимирского ополья // Почвоведение. 1974. № 6. С. 17–27.

11. Савин И.Ю., Вернюк Ю.И., Фераслис И. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов для оперативного мониторинга продуктивности почв // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 80. С. 95–105.

12.Шинкевич М.В., Воробьева Н.Г., Алтынцев М.А., Попов Р.А., Арбузов С.А., Флоров А.В. <u>Оценка точности плотной цифровой модели</u> поверхности и ортофотопланов, полученных по материалам аэрофотосъемки с БЛА серии Supercam // Геоматика. 2015. № 4. С. 37–41. 13.Якушев В.П., Лекомцев П.В., Матвеенко Д.А., Петрушин А.Ф., Якушев В.В. Применение дистанционного зондирования в системе точного земледелия // Вест. РАСХН. 2015. № 1. С. 23–25.

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

15.*Akar A*. Evaluation of accuracy of dems obtained from uav-point clouds for different topographical areas // Int. J. Eng. Geo. Vol. 2 (3). 2017. P. 110–117. DOI: <u>10.26833/ijeg.329717</u>.

16.Brogi C., Huisman J.A., Pätzold S., von Hebel C., Weihermüller L., Kaufmann M.S., van der Kruk J., Vereecken H. Large-scale soil mapping using multi-configuration EMI and supervised image classification // Geoderma. Vol. 335. 2019. P. 133–148.

DOI: <u>10.1016/j.geoderma.2018.08.001</u>.

17. Capolupo A., Pindozzi S., Okello K., Fiorentino N., Boccia L. Photogrammetry for environmental monitoring: The use of drones and hydrological models for detection of soil contaminated by copper // Sci. Total Environm. 2015. Vol. 514. P. 298–306.

18.De Reu J., Bourgeois J., Bats M., Zwertvaegher A., Gelorini V., De Smedt P., Chu W., Antrop M., De Maeyer P., Finke P., Van Meirvenne M., Verniers J, Crombé P. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes // Geomorphology. Vol. 186. 2013. P. 39–49.

19. Florinsky I.V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology (Second Edition). Academic Press. 2016. 506 p.

20. *Gruijter J.J. de, McBratney A.B., Minasny B., Wheeler I., Malone B.P., Stockmann U.* Farm-scale soil carbon auditing // Geoderma. 2016. No. 265. P. 120–130. DOI: <u>10.1016/j.geoderma.2015.11.010</u>.

21. *Guenette K.G., Hernandez-Ramirez G.* Tracking the influence of controlled traffic regimes on field scale soil variability and geospatial modeling techniques // Geoderma. 2018. Vol. 328. P. 66–78.

DOI: <u>10.1016/j.geoderma.2018.04.026</u>.

22. *Eltner A., Baumgart P., Maas H.-G., Faust, D.* Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. Earth Surface Processes and Landforms. 2014. No. 40 (6). P. 741–755.

DOI: <u>10.1002/esp.3673</u>.

23. *Eltner A., Maasa H.-G, Faus D.* Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes // Geoderma. Vol. 313. 2018. P. 217–232. DOI: <u>10.1016/j.geoderma.2017.10.034</u>.

24.*Nex F., Remondino F.* UAV for 3Dmapping applications: a review // Appl. Ge-omat. 2014. Vol. 6(1). P. 1–15. DOI: <u>10.1007/S12518-013-0120-x</u>.

25.*Marijan Car, Danijela Jurić Kaćunić, Meho-Saša Kovačević*. <u>Application</u> of Unmanned Aerial Vehicle for Landslide Mapping // New Technologies in Engineering Geodesy and Multisensor Systems. 2016. TS 6. P. 549–560.

26.*Minasny B., McBratney A.* Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. Vol. 264. P. 301–311

27.*Pierrot-Deseilligny M., De Luca L., Remondino F.* Automated imagebased procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation // Geoinforms FCE CTU J. 2011. Vol. 6. P. 291–299.

28. Ruzgiene B., Berteska T., Gecyte S., Jakubauskiene E., Aksamitauskas V.C. The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation // Measurement. 2015. Vol. 73. P. 619–627.

DOI: <u>10.1016/j.measurement.2015.04.018</u>.

29. *Turcotte D.* Fractals and chaos in geology and geophysics. NX.: Cambridge University Press. 1992. 221 p.

30. Zeybeka M., Şanlıoğlu I. Point cloud filtering on UAV based point cloud // Measurement. 2019. Vol. 133. P. 99–111.

DOI: <u>10.1016/j.measurement.2018.10.013</u>.

31. *Wieland R., Dalchow C.* Detecting landscape forms using Fourier transformation and singular value decomposition (SVD) // Computers & Geosciences. Vol. 35. Issue 7. 2009. P. 1409–1414.

32. Weiss A.D. Topographic position and landforms analysis // Poster Presentation. ESRI Users Conference. San Diego. CA (2001). URL: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf.

33. Woodget A.S., Carbonneau P.E., Visser F., Maddock I.P. Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry // Earth Surf. Process. Landforms 40. P. 47–64 (2015). DOI: 10.1002/esp.3613.

THE SCALE LEVELS IDENTIFICATION FOR THE PLOWLAND TOPOGRAPHY ORGANIZATION

N. V. Minayev^{1*}, A. A. Nikitin^{2**}, D. N. Kozlov^{3***}

 ¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Russia, 127550, Moscow, Timiryazevskaya str., 49
* https://orcid.org/0000-0003-0718-3383, e-mail: Arjuna@yandex.ru

> ²Skolkovo Institute of Science and Technology, Russia, 143026, Moscow, Nobel' str., 3 ** https://orcid.org/0000-0003-3563-3388

³V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia, 119017, Moscow, Pizhevskiy per., 7, build. 2 *** <u>https://orcid.org/0000-0003-0103-0300</u>, e-mail: <u>kozlov_dn@esoil.ru</u> Received 02.11.2018, Revised 02.11.2018, Accepted 12.03.2019

The identification of factor and indicational features, which are characterized by the high informativity and field of view in relation to the soil cover organization, plays a very important role in the soil mapping. Such characteristics are more common for Unmanned Aerial Vehicles (UAV), which include spectrazonal imagery and digital elevation model (DEM) with

ultrahigh spatial resolution, necessary for obtaining fine and large scale images. However, the agrogenic micro- and nanotopography is considered as a noise during the studies of the soil cover topographic differentiation under the conditions of plowland, as the genetic soil properties correlate with natural micro- and mesotopography. A filtration algorithm for the land surface roughness, which is not related to the spatial organization of the objective soil properties, is suggested in the paper. The stages of linear dimension identification for self-similar structures of the glacial and agrogenic based Fourier topography on two-dimensional decomposition are demonstrated using the example of a field topography digital model for the area of 125 hectares. Filtering in the frequency domain allowed restoring the natural field topography and substantiating the effective resolution of the DEM and the size of the area to calculate local morphometric specificities of the topography for digital soil mapping.

Keywords: geomorphometry, digital elevation model, UAV survey, Fourier analysis, Vladimirskoe Opolye.

REFERENCES

1. Alifanov V.M., Gugalinskaya L.A., Paleokriogenez i struktura pochvennogo pokrova Russkoi ravniny (Paleocryogenesis and soil cover structure of the Russian Plain), *Pochvovedenie*, 1993, No. 7, pp. 65–75.

2. Vedyushkin M.A., O fraktal'nom podkhode k opisaniyu prostranstvennoi struktury rastitel'nykh soobshchestv (On the fractal approach to the description of the spatial structure of plant communities), In: *Problemy monitoringa i modelirovaniya dinamiki lesnykh ekosistem* (Problems of monitoring and modeling the dynamics of forest ecosystems), Moscow: AO "Zhurnal Ekosinform", 1995, pp. 182–201.

3. Davis J.C., *Statisticheskii analiz dannykh v geologii* (Statistics and data analysis in geology), Vol. 2, Moscow: Nedra, 1990, 427 p.

4. Eremenko E.A., Panin A.V., *Lozhbinnyi mezorel'ef Vostochno-Evropeiskoi ravniny* (Hollow mezorelief of the East European plain), Moscow: MIROS, 2010, 192 p.

5. Zakharov V.S., Samopodobie struktur i protsessov v litosfere po rezul'tatam fraktal'nogo i dinamicheskogo analiza: Dis. dokt. geol.-mineral. nauk (Self-similarity of structures and processes in the lithosphere by the results of fractal and dynamic analysis, Dr. geol.-mineral. sci. thesis), Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2014, 281 p.

6. Kiryushin V.I., Kiryushin S.V., *Agrotekhnologii* (Agrotechnologies). Saint Petersburg: Lan', 2015, 464 p.

7. Kotlov I.P., Puzachenko Yu.G., The structure of the relief of the Russian Plain as a landscape forming factor, Landscape Study – Theory, Methods, Regional Studies, Practice, *Proc. of the XI Landscape Conf.*, Moscow, Geogr. fak., Lomonosov Moscow State University, 2006, pp. 166–172. Available at: http://www.landscape.edu.ru/files/landscape_planning2006.pdf.

8. Makeev A.O., Dubrovina I.V., Geografiya, genezis i evolyutsiya pochv Vladimirskogo opol'ya (Genesis, geography and evolution of the Vladimirskoe Opolye soils), *Pochvovedenie*, 1990, No. 7, pp. 5–26.

9. Puzachenko Yu.G., Onufrenya I.A., Analiz ierarkhicheskoi organizatsii rel'efa (Analyses of relief hierarchic organization), *Izvestiya RAN*, Seriya geograficheskaya, 2002, No. 4, pp. 29–38.

10. Rubtsova L.P., O genezise pochv Vladimirskogo opol'ya (Genesis of the soils in Vladimirskoe Opolye), *Pochvovedenie*, 1974, No. 6, pp. 17–27.

11.Savin I.Yu., Vernyuk Yu.I., Feraslis I., Vozmozhnosti ispol'zovaniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya operativnogo monitoringa produktivnosti pochv (<u>Possible use of pilotless aircrafts for operative monitoring of the soil productivity</u>), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2015, Vol. 80, pp. 47–55.

12. Shinkevich M.V., Vorob'eva N.G., Altyntsev M.A., Popov R.A., Arbuzov S.A., Florov A.V., Otsenka tochnosti plotnoi tsifrovoi modeli poverkhnosti i ortofotoplanov, poluchennykh po materialam aerofotos'emki s BLA serii Supercam (Estimation of the accuracy of a dense digital elevation model and orthophotos obtained from aerial photography with UAV Supercam series), *Geomatika*, 2015, No. 4, pp. 37–41.

13. Yakushev V.P., Lekomtsev P.V., Matveenko D.A., Petrushin A.F., Yakushev V.V., Primenenie distantsionnogo zondirovaniya v sisteme tochnogo zemledeliya (Application of remote sensing in the precision farming system), *Vestnik Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*, 2015, No. 1, pp. 23–25.

14. Advances in Digital Terrain Analysis, Zhou Q., Lees B., Tang G., (Eds.), 2008, XIV, 462 p.

15. Akar A., Evaluation of accuracy of dems obtained from uav-point clouds for different topographical areas, *Int. J. Eng. Geo.*, 2017, Vol. 2, pp. 110–117, DOI: <u>10.26833/ijeg.329717</u>.

16.Brogi C., Huisman J.A., Pätzold S., von Hebel C., Weihermüller L., Kaufmann M.S., van der Kruk J., Vereecken H., Large-scale soil mapping using multi-configuration EMI and supervised image classification, *Geoderma*, 2019, Vol. 335, pp. 133–148,

DOI: <u>10.1016/j.geoderma.2018.08.001</u>.

17.Capolupo A., Pindozzi S., Okello K., Fiorentino N., Boccia L., Photogrammetry for environmental monitoring: The use of drones and

hydrological models for detection of soil contaminated by copper, Sci. Total Environm., 2015, Vol. 514, pp. 298–306.

18. De Reu J., Bourgeois J., Bats M., Zwertvaegher A., Gelorini V., De Smedt P., Chu W., Antrop M., De Maeyer P., Finke P., Van Meirvenne M., Verniers J, Crombé P., Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes, *Geomorphology*, 2013, Vol. 186, pp. 39–49.

19. Florinsky I.V., *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology* (Second Edition), Academic Press, 2016, 506 p.

20. Gruijter J.J. de, McBratney A.B., Minasny B., Wheeler I., Malone B.P., Stockmann U., Farm-scale soil carbon auditing, *Geoderma*, 2016, No. 265. pp. 120–130, DOI: <u>10.1016/j.geoderma.2015.11.010</u>.

21. Guenette K.G., Hernandez-Ramirez G., Tracking the influence of controlled traffic regimes on field scale soil variability and geospatial modeling techniques, *Geoderma*, 2018, Vol. 328, pp. 66–78,

DOI: <u>10.1016/j.geoderma.2018.04.026</u>.

22. Eltnera A., Baumgart P., Maas H.-G., Faust, D., Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, Vol. 40, pp. 741–755,

DOI: <u>10.1002/esp.3673</u>.

23. Eltnera A., Maasa H.-G, Faus D., Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes, *Geoderma*, Vol. 313, 2018, pp. 217–232, DOI: <u>10.1016/j.geoderma.2017.10.034</u>.

24. Nex F., Remondino F., UAV for 3Dmapping applications: a review, *Appl. Geomat*, 2014, Vol. 6(1). pp. 1–15, DOI: <u>10.1007/S12518-013-0120-x</u>.

25. Marijan Car, Danijela Jurić Kaćunić, Meho-Saša Kovačević., <u>Application</u> of <u>Unmanned Aerial Vehicle for Landslide Mapping</u>, *New Technologies in Engineering Geodesy and Multisensor Systems*, 2016, TS6, pp. 549–560.

26. Minasny B., McBratney A., Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*, 2016, Vol. 264, pt. B, pp. 301–311.

27. Pierrot-Deseilligny M., De Luca L., Remondino F., Automated imagebased procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation, *Geoinform.sFCE CTU J*, 2011, Vol. 6, pp. 291–299.

28. Ruzgiene B., Berteska T., Gecyte S., Jakubauskiene E., Aksamitauskas V.C., The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation, *Measurement*, 2015, Vol. 73, pp. 619–627,

DOI: <u>10.1016/j.measurement.2015.04.018</u>.

29. Turcotte D., *Fractals and chaos in geology and geophysics*, Cambridge University Press, 1992, 221 p.

30.Zeybeka M., Şanlıoğlu I., Point cloud filtering on UAV based point cloud, *Measurement*, 2019, Vol. 133, pp. 99–111, POL 101012

DOI: <u>10.1016/j.measurement.2018.10.013</u>.

31. Wieland R., Dalchow C., Detecting landscape forms using Fourier transformation and singular value decomposition (SVD), *Computers & Geosciences*, 2009, Vol. 35, pp. 1409–1414.

32. Weiss A.D., Topographic position and landforms analysis, *Poster Presentation, ESRI Users Conference*, San Diego, CA, 2001, URL: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf.

33. Woodget A.S., Carbonneau P.E., Visser F., Maddock I.P., Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry, *Earth Surf. Process and Landforms*, 2015, Vol. 40, pp. 47–64, DOI: <u>10.1002/esp.3613</u>.

Ссылки для цитирования:

Минаев Н.В., Никитин А.А., Козлов Д.Н. Идентификация масштабных уровней организации рельефа пашни // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 96. С. 3-21. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-96-3-21

For citation:

Minayev N.V., Nikitin A.A., Kozlov D.N. The scale levels identification for the plowland topography organization, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 96, pp. 3-21, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-96-3-21