

20. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення / за ред. І.П. Яцука, С.А. Балюка. – Київ, 2013. – 104 с.

EVALUATION OF ZONAL AND REGIONAL PECULIARITIES OF HETEROGENEITY OF THE SOIL COVER IN UKRAINE

I.V. Plisko

Summary

Based on studies of spatial heterogeneity of the soil cover of Ukraine (by the example of six fields of different natural and climatic zones using geostatistical methodology) we justified the transition from zonal ones to spatially differentiated farming systems. The methods of rational accounting for heterogeneity (field parceling, limited use of zonal (adaptive) technologies, equalization of the fertility level of individual parts of a field, etc.) were determined on the basis of quantitative estimates of the heterogeneity. In course of the research, the heterogeneity of the majority of indicators shows certain prospects of implementation of spatially differentiated system of agriculture. It implies a differentiated application of fertilizers, plant protection products, chemical ameliorants and machining of soil on all investigated sites.

Поступила 17.10.17

УДК 631.421

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ЦИФРОВОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ПОЧВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Т.Ю. Бындыч

*Институт почвоведения и агрохимии имени А.Н. Соколовского,
г. Харьков, Украина*

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость разработки и внедрения систем сбалансированного землепользования и точного земледелия в Украине актуализирует усовершенствование методологии и технологий учета и мониторинга почвенных ресурсов, проводимых на локальном территориальном уровне (уровень поля). На протяжении последних десятилетий в мире широкое развитие получили дистанционные системы наблюдения за состоянием окружающей среды, которые обеспечивают широкий круг потребителей актуальной и постоянно обновляющейся информацией о состоянии ее основных компонентов. Ключевыми элементами этих систем являются использование оперативных данных многоспектрального космического

сканирования (МСКС) и автоматизированный способ их дешифрирования, а также использование GPS-приемников, геоинформационных систем (ГИС) и возможностей Internet для сбора, накопления, обработки и распространения информации, которая позволяет повысить уровень рационального использования почвенных ресурсов. В этой связи, разработка технологий использования космических снимков высокого пространственного разрешения для всестороннего исследования локальных структур почвенного покрова (ПП) может быть рассмотрена не только в качестве фундамента создания национальной и региональных систем дистанционного мониторинга ПП, но и как основы их успешной интеграции в европейские и глобальные системы наблюдения за окружающей средой.

В этой связи, следует напомнить, что цифровые данные МСКС являются одной из картографических моделей земной поверхности и обладают такими информационными свойствами как избирательность, масштаб и метричность, непрерывность, наглядность, обзорность, географическое соответствие и геометрическое сходство [1]. Остальные важнейшие для потребителя информационные свойства, такие как абстрактность, синтетичность, однозначность и логичность, результирующих картографических материалов, обеспечиваются только в процессе дешифрирования снимков. При этом ПП является тем сложным объектом дешифрирования, который характеризуется произвольностью форм контуров, отсутствием визуальной упорядоченности в их расположении на местности, а также незначительной продолжительностью периода времени для съемки открытой почвенной поверхности, что усложняет индикацию почв по прямым дешифрирующим признакам. В связи с этим, почвенное дешифрирование относится к комплексным видам обработки изображений, требующих апробации комплекса подходов и критериев, обосновывающих корректность созданных по данным МСКС пространственных моделей ПП и обеспечивающих решение ряда гносеологических задач, в частности:

- а) выявления – раздельного восприятия элементов (объектов) изображения на снимке без определения их сущности;
- б) распознавания – получения и оценивания целостного образа, допускающее его разделение на отдельные элементы с установлением их качественных и количественных характеристик;
- в) классификации – выявления сущности общих признаков индивидуальных объектов, переход от их индивидуальной характеристике к обобщенной;
- г) интерпретации – прогноза развития или изменения объекта на основе выявленных сведений о нем и анализа ситуации в целом [2].

Обобщение научных публикаций позволяет сделать вывод об активной апробации использования данных МСКС и различных методов их дешифрирования для изучения и картографирования почв сельхозугодий в различных природных зонах мира [3–9]. Однако, наряду с разнообразием используемых в мире технологий почвенного дешифрирования, по-прежнему не решены вопросы анализа и оценивания его результатов. Также следует признать, что использование даже общеизвестных и классических приемов, предусмотренных основами статистической теории распознавания и теорией вероятности, традиционно используемых при дешифрировании аэрокосмических изображений пространственно-организованных природных явлений и объектов, также нуждаются в дополнительном переосмыслении почвоведцами.

Ранее сотрудниками лаборатории дистанционного зондирования ПП ННЦ «ИГА имени А.Н. Соколовского» уже рассмотрен ряд практически значимых вопросов цифрового картографирования локальных структур ПП по данным космической съемки [10–12], а также верификации и анализа, построенных на их основе, почвенно-картографических материалов [13–15]. Полученный опыт показывает, что совершенствование системы критериев и методов, позволяющих анализировать и оценивать результаты почвенного дешифрирования, должно основываться, с одной стороны, на традиционном (или классическом) в генетическом почвоведении подходе к изучению закономерностей пространственного распределения факторов и процессов почвообразования, а с другой – на детальном учете специфики цифровых данных МСКС высокого и сверхвысокого пространственного разрешения как одного из новейших носителей информации о ПП.

Целью данной работы является формирование системы критериев и методических подходов, позволяющих анализировать результаты пространственной дифференциации ПП по данным МСКС на локальном территориальном уровне, а также изложение результатов их частичной апробации на примере одного из исследовательских полигонов в Украине.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследований – локальные структуры ПП и их картографические модели, построенные в результате дешифрирования данных МСКС высокого пространственного разрешения.

Предмет исследований – латеральная неоднородность почв.

Территориальным объектом для апробации разработанных подходов к анализу результатов почвенного дешифрирования данных МСКС является полигон «Тишки 2», расположенный в Харьковском районе Харьковской области, который представляет распространенную в регионе элементарную ландшафтную структуру – переход водораздельной волнистой местности в склон северной и северо-восточной экспозиции одной из балочных впадин. Общая площадь полигона составляет около 140 га.

Согласно общеизвестной системе физико-географического районирования, эта территория относится к Золочевско-Харьковскому району Харьковской лесостепной области юго-западных отрогов Среднерусской возвышенности, для которой характерно сложное сочетание водораздельных волнистых местностей с глубокими среднегумусными выщелоченными черноземами и долинно-балочных, овражно-балочных приречных местностей с эродированными оподзоленными черноземами и темно-серыми лесными почвами [16].

В ходе исследований использованы данные космического аппарата Landsat 8 (съемка 01.05.2017), а также топографическая основа масштаба 1:10000.

Для решения поставленных задач использовались, в основном, статистические методы и методы геоинформационной обработки данных. Так, для географической привязки, учета яркостей элементов изображения в различных диапазонах спектра, основной обработки, преобразований, общего анализа и числовой таксономии космического изображения использовали ГИС TNT и ENVI.

В результате первого этапа тематического дешифрирования созданы картографические модели ПП полигона, которые использованы для разработки системы

опробования почв. Полевое обследование полигона проведено в соответствии с действующей в Украине методикой, предусматривающей морфологическое описание почвенных разрезов и прикопок [17], а также аналитическое исследование отобранных образцов почвы. При этом, точная географическая привязка всех точек отбора проб почвы, почвенных разрезов и прикопок проведена с использованием приборов GPS. В частности, в ходе полевых исследований на полигоне заложено 5 полнопрофильных почвенных разрезов и 3 прикопки, а также отобрано 51 пробу из поверхностного слоя почвы по регулярной сети отбора (через каждые 100 метров). Схема расположения точек отбора проб почвы на этом полигоне представлена на рис. 1.

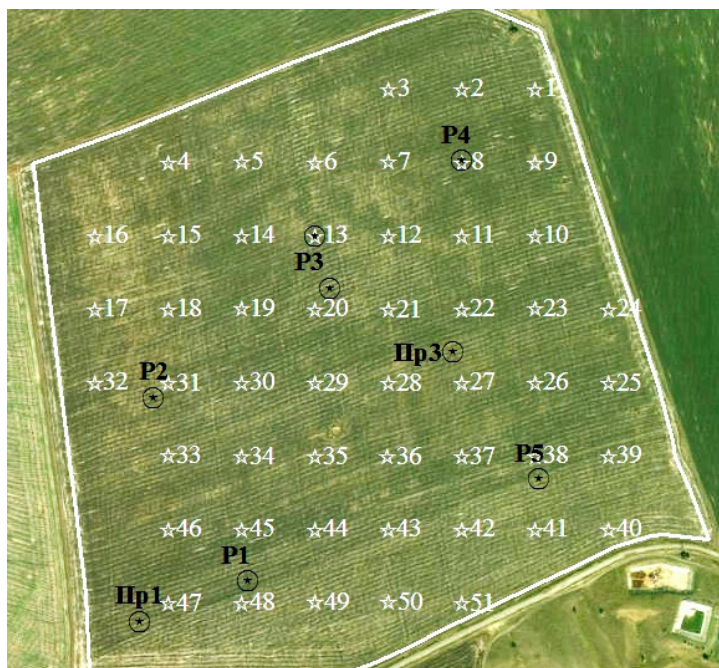


Рис. 1. Схема расположения точек отбора почвенных проб на полигоне «Тишки 2»

В камеральных условиях, во всех почвенных образцах определялось общее содержание гумуса по методу И.В. Тюрина, pH водной вытяжки – колориметрическим методом, pH солевой – компенсационным методом с помощью потенциометра, качественный состав водной вытяжки – с использованием комплексометрического, аргентометрического и пламенно-фотометрического методов, состав обменных оснований – по методу Шолленберга, а также гранулометрический состав – по методу Н.А. Качинского [18].

Результаты аналитического исследования почвенных проб составили базу данных для региона и обработаны с использованием как пакета программ Statistica, так и с помощью ГИС.

Созданная в ГИС цифровая модель рельефа полигона (ЦМР) позволила в автоматическом режиме получить электронные картограммы экспозиции и крутизны склонов, абсолютных высот, использование которых имело большое значение на всех этапах верификации и анализа результатов дешифрирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку методологической основой почвенной картографии является концепция структуры ПП, сформулированная в свое время В.М. Фридландом, анализ результатов цифрового картографирования локальных структур ПП по данным МСКС следует проводить в соответствии с ее основными принципами и положениями. Согласно им, элементарные структуры ПП, наряду с ЭПА, являются теми основными объектами картографирования, которые выделяются по типологическому принципу и являются основой для конструирования более крупных почвенно-территориальных образований. И в этом контексте, основной научной проблемой анализа и оценивания результатов почвенного дешифрирования данных МСКС высокого и сверхвысокого пространственного разрешения является установление корректности дискретизации ПП.

Следует напомнить, что дискретизация каждого географического объекта имеет не только территориальную, но и признаковую составляющую [19]. Относительно ПП, «признаковая дискретизация» состоит в обосновании и характеристике элементарных почвенных ареалов (ЭПА) и элементарных почвенных структур (ЭПС), в то время как «территориальная» (или собственно картографическая) – в локализации почвенно-территориальных объектов и установлении их границ [20]. И таким образом, результат картографирования ПП в значительной степени определяется классификацией низших таксономических единиц, а также установленными подходами к типизации почвенных комплексов (выделение элементарных и мезоструктур ПП). В тоже время, нельзя забывать о необходимости увязки существующих в генетическом почвоведении подходов к диагностике и описанию почв с картографическим изображением, особенно для случая, когда картографирование проведено на основе обработки оптической яркости поверхностного слоя почвы.

Также важным аспектом анализа результатов цифрового картографирования почв является необходимость учета специфики методов картографического моделирования, каждый из которых имеет недостатки и ограничения в применении. Этот аспект является особенно важным при разработке и применении автоматизированных систем картографирования почв по данным МСКС, которые очень часто основаны на использовании кластерного анализа. Несмотря на то, что основная цель кластерного анализа заключается в нахождении структуры, на практике эти методы зачастую привносят структуру в данные, что не обязательно совпадает с реальной или естественной для исследуемых объектов структурой [21]. Кроме этого, результаты территориальной дискретизации ПП по данным МСКС с использованием этого метода, также не имеют четкую увязку с действующими классификационными схемами, которые лежат в основе диагностики низших таксономических единиц. Таким образом, основой эффективного использованию этого вида анализа многомерных данных для целей почвенного дешифрирования является разработка и апробация способов, позволяющих отличать «реальные» группировки (которые соответствуют как природе отдельных почвенных процессов и свойств, так и современным методам их определения) от тех, что привнесены методом кластеризации.

Среди всего многообразия существующих в мире подходов, одним из наиболее надежных способов установления взаимной обусловленности признаковой и территориальной дифференциации ПП, а также анализа и оценивания качества цифрового картографирования ПП по данным МСКС, представляется хорошо известный в почвоведении статистико-картографический анализ, предусматри-

вающий проверку корректности выделения низших почвенно-территориальных единиц на основе [20, 22]:

- статистического анализа, который устанавливает или корректирует разделение почвенных объектов в признаковом пространстве (таксономические выделы);
- картографического контроля или апробации признакового разделения в реальном географическом пространстве;
- анализа связей ЭПА и элементарных почвенных структур с факторами дифференциации ПП.

Однако, учитывая особенности современного этапа развития почвоведения, каждая из составляющих статистико-картографического анализа может быть усовершенствована за счет использования геостатистических методов, которые основаны на теории регионализированных переменных [23]. Большинство научных задач, решаемых геостатистикой, а к ним относится описание и анализ пространственного варьирования свойства в пределах ареала, района, полигона и т.п., пространственное моделирование, обоснование оптимальных схем отбора проб, являются определяющими и для анализа результатов цифрового картографирования локальных структур ПП по данным МСКС. Лишь следует помнить, что такой подход выдвигает определенные требования к объему эмпирических данных о ПП, обеспечивающих принципиальную возможность проведения геостатистического анализа. В целом же, необходимость применения аппарата геостатистики для анализа результатов картографирования ПП по данным космической съемки определяется еще и тем, что это обеспечивает проверку полученных почвенно-картографических материалов на «однородность и концентрацию» – две исключительно важные характеристики территориального распределения признака объекта и меры оценки качества схем членения территории [24].

Еще одним важным аспектом анализа результатов цифрового картографирования локальных структур ПП по данным МСКС является необходимость использования методов, позволяющих обобщать результаты дискретизации ПП, причем в лаконичной форме. И действительно, систематическое поступление космических снимков хорошего качества и сравнительно высокая скорость их обработки обеспечивают научно-исследовательскую деятельность почвоведов огромным количеством материала, который нуждается в интеграции. В этой связи, логичным представляется использование системы критериев и методов, известных из теории информации, а также географической науки. В частности, создание информационной модели территориальной дифференциации и вычисление информационного показателя сложности заслуживают особого внимания. Напомним, что показателем сложности в информационной модели территориальной дифференциации является информационная (энтропийная) функция разнообразия, основанная на вероятностной формализации территориального расчленения. Пространственные системы, элементы которых могут быть заданы вероятностями с обязательным условием, чтобы сумма всех вероятностей составляла 1,0, имеют информационный показатель разнообразия или сложности морфологического расчленения, который вычисляют по формуле К. Шеннона (1) [25]:

$$H = -\sum p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

где p_i – вероятность i -го элемента морфологического расчленения.

Использование этого показателя позволяет оценивать разновременные результаты дискретизации ПП по данным МСКС, поскольку увеличение числа элементов территориального разделения или изменение в соотношении их площадей фиксируется соответствующими изменениями информационного показателя сложности.

Анализ формы почвенных контуров, полученных по данным МСКС, также может быть проведен посредством расчета нескольких количественных показателей, интерпретация которых позволяет не только судить о физиономическом содержании современного агроценоза, но и выявлять особенности истории и динамики развития всей территории, влияние различных факторов почвообразования и антропогенного воздействия на современное состояние локальных структур ПП. В этой связи, группа показателей, характеризующие контурность и взаимное расположение почвенных ареалов, также имеет перспективы, поскольку их определение часто является шагом для установления генезиса почвенных контуров или присущим им естественным процессам [26].

Перечисленные выше аспекты анализа результатов цифрового картографирования ПП по данным МСКС позволили сформировать три основные группы критериев, позволяющих проводить анализ или оценивание качества дискретизации локальной структуры ПП (рис. 2).



Рис. 2. Основные критерии оценивания результатов цифрового картографирования ПП по данным космической съемки

Поскольку объем статьи не позволяет в качестве примера изложить всю многоаспектность анализа результатов дискретизации ПП для опытного полигона по данным МСКС, остановимся лишь на тех из них, которые касаются экспертного выбора оптимального варианта кластерной карты, поскольку это является ключевым этапом дешифрирования.

В связи с тем, что подобранное космическое изображение полигона «Тишки 2» имело набор метаданных, в ходе исследований был использован полный алгоритм почвенного дешифрирования, который на первом этапе включает в себя радиометрическую и атмосферную коррекцию изображения, расчет вегетационного индекса NDVI, а также общий статистический анализ изображения для всех каналов сканирования. Выраженная асимметрия и полимодальность распределений оптических характеристик открытой почвенной поверхности в шести диапазонах сканирования позволили предположить, что распределения представляют совмещение не только двух, но и большего количества подсовкупностей, что является вероятным следствием неоднородности ПП, под которой следует понимать закономерный характер варьирования почвенных свойств. Сопоставление основных вариационно-статистических показателей изображения полигона позволило определить большую информативность четвертого, пятого и шестого каналов съемки. В связи с этим, изображения этих диапазонов сканирования использованы для последующей их классификации, которая в автоматических системах дешифрирования чаще всего проводится методами кластерного анализа.

На этапе классификации изображения были применены метод постепенного увеличения степени дискретизации изображения (начиная с двух и заканчивая 12 классами), а также экспертное оценивание результатов дискретизации изображения, проведенное двумя методами кластеризации: K-средних и ISODATA. Сравнительный анализ показал, что поскольку алгоритм ISODATA использует минимальное спектральное расстояние для определения соответствующего класса (кластера) для каждого из элементов изображения, картографические модели ПП полигона, полученные с его использованием, отличаются большим количеством ареалов небольшой площади. В целом, общий рисунок таких почвенно-картографических материалов можно охарактеризовать как «поскутная структура», изучение которой имеет перспективы для детального изучения почв, в частности, для определения элементарных почвенных ареалов (ЭПА) и почвенных комбинаций (ПК). Сопоставление взаимного расположения кластеров и значений евклидова расстояния, позволило определить соподчиненность классов, что важно для установления основных элементов неоднородности ПП полигона.

Для проверки обоснованности границ между контурами, проанализированы графики основных геостатистических характеристик оптической яркости почвенной поверхности для каждого из использованных диапазонов сканирования (автокорреляционная функция, профиль яркостей, полувариограмма, график первой и второй производных), построенных по восьми линейным направлениям – трансектам. Так, рассмотрение графиков перечисленных выше характеристик для трансекта № 2, представленных для примера в таблице, позволил выявить периодическую составляющую в изменении оптических показателей почвенной поверхности в четвертом и пятом каналах съемки, что в целом, подтвердило корректность границ, полученных с использованием алгоритма

ISODATA. Рассмотрение подобных графиков для всех трансектов позволило, методом экспертной оценки, выбрать оптимальный вариант классификации изображения ПП полигона, созданного по методу ISODATA на уровне дискретизации 8 классов.

Этот вариант кластерной карты использован для планирования мест закладки почвенных разрезов и прикопок, необходимых для изучения вертикального строения отдельных элементов структуры ПП. В частности, по данным морфологического описания почвенных разрезов установлено, что ПП полигона представлен черноземом типичным малогумусным легкоглинистым на лессовидном суглинке (согласно национальной классификации почв Украины [27]).

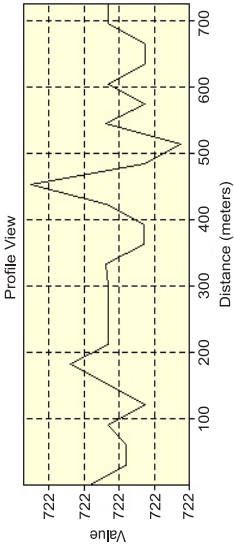
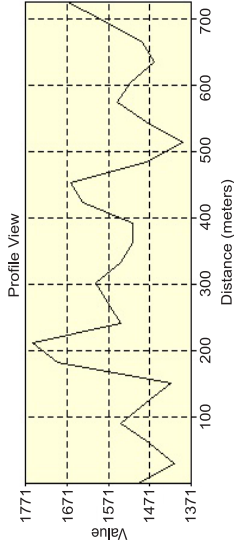
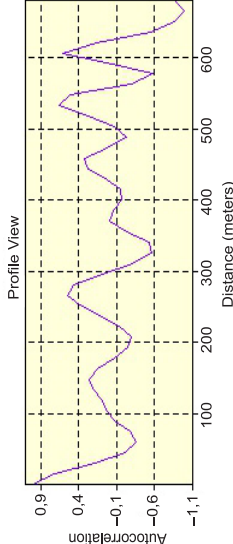
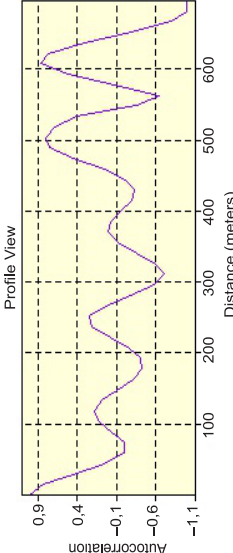
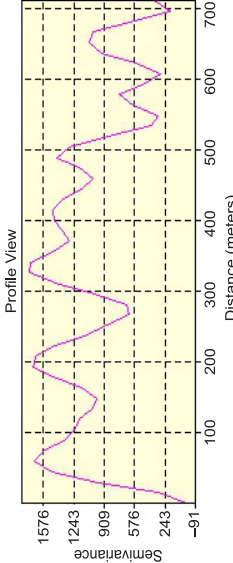
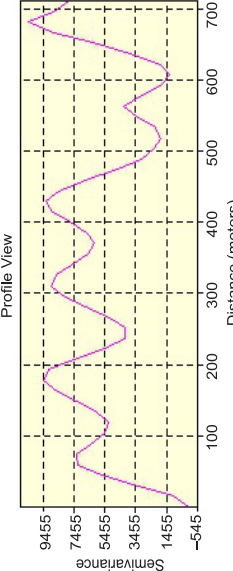
Необходимо отметить, что картографирование полигона «Тишки 2» можно отнести к непростому случаю территориальной дискретизации ПП, при которой проводится выделение низших таксономических единиц, сложного пахотными черноземами (латеральная неоднородность свойств которых во многом определяется систематическим сельскохозяйственным использованием). Диагностика и картографирование таких объектов, как правило, вызывает определенные сомнения даже у самых опытных почвоведов, в связи с недостаточной определенностью различий для выделения соседних контуров в ходе полевого обследования. Это определяется тем, что, во-первых, систематически близкие почвы отличаются меньшим количеством качественных или информативных почвенно-экологических показателей, во-вторых, использование каких-либо градационных шкал для их описания осложняется значительным пространственным варьированием диагностических признаков. Кроме этого, черноземы как результат гумусово-аккумулятивного типа почвообразования, обладают низкими оптическими характеристиками открытой почвенной поверхности во всех диапазонах сканирования и являются низко контрастными по данным космической съемки.

В этой связи, первым и определяющим этапом верификации и анализа результатов почвенного дешифрирования данных МСКС явился анализ данных по почвенным разрезам и прикопкам. Установлено, что наиболее крупные по площади классы почв, выделенные в процессе кластеризации, отличались по мощности гумусированной части профиля и глубине вскипания карбонатов. Так, первый класс представляет чернозем типичный малогумусный среднемощный высоковскипающий, третий – среднемощный, но обычный по глубине вскипания карбонатов, четвертый – маломощный и обычный по глубине вскипания карбонатов, седьмой – чернозем, выщелоченный и мало отличающийся от него чернозем мощный глубоковскипающий, восьмой – чернозем типичный мощный, глубоковскипающий.

Поскольку несколько классов почв малой площади не были опробованы как в результате точечного отбора почвенных проб, так и по данным почвенных разрезов, в ходе исследований было осуществлено пространственное моделирование ряда почвенных показателей. В частности, построение картограммы общего содержания гумуса в почвах полигона проведено с использованием эмпирического байесовского кригинга, который, как известно, позволяет учесть неопределенности, возникающие при построении вариограммы [28]. Результаты такого моделирования представлены на рис. 3.

Результаты пространственного анализа изменений оптической яркости почвенной поверхности по трансекту № 2

Таблица

№	Диапазоны сканирования	
	4 канал (0,630-0,680)	5 канал (0,845-0,885 мкм)
1	Профиль оптической яркости	
		
	Корелограмма	
2		
3	Полувариограмма	
		

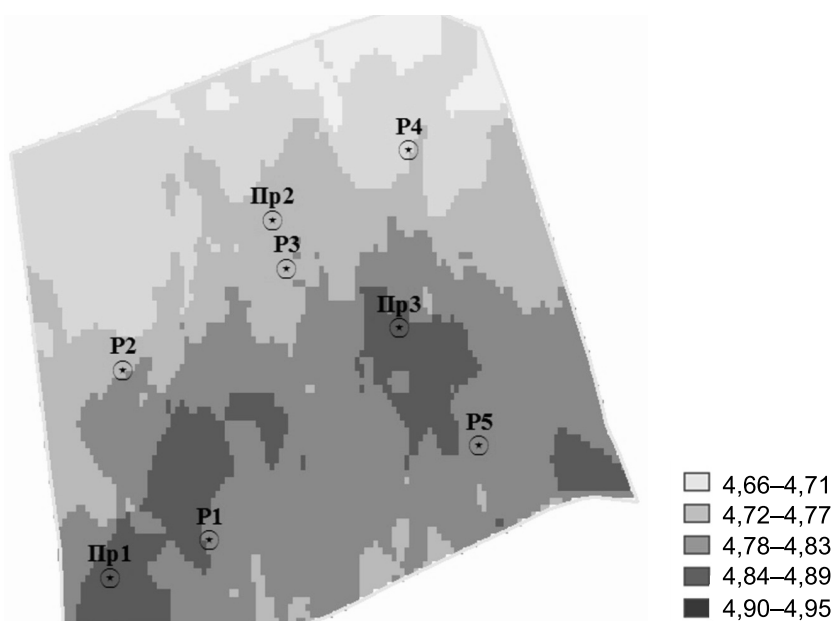


Рис. 3. Картограмма значений общего содержания гумуса на полигоне «Тишки 2»
(в % от массы)

На основе полученной картограммы, в пределах каждого из выделенных классов проведен статистический анализ по показателю общего содержания гумуса, основные результаты которого графически представлены на рис. 4. Именно на основании этих данных решалась задача первичного анализа этого варианта кластерной карты для разделения элементов ПП в признаковом пространстве. В частности, анализ графика позволяет сделать вывод о сравнительной однородности пятого, седьмого и восьмого классов (центральное положение медианы в боксе). Значительно отличающимся от закона нормального распределения можно считать распределение общего содержания гумуса для первого, второго, третьего и шестого каналов. Также достаточно выраженной можно принять различимость между первым, третьим и восьмым классами (по значению медианы).

Результаты кластеризации данных МСКС сопоставлено также с картограммой уклонов почвенной поверхности (рис. 5). Такое сравнение показало четкую приуроченность третьего, четвертого и седьмого классов к склонам определенной крутизны и экспозиции. Так, седьмой и четвертый классы почв занимают верхнюю часть склона, характеризующуюся незначительными уклонами поверхности, что вполне согласуется с традиционными представлениями об условиях формирования выщелоченных или так называемых глубоко вскипающих черноземов в условиях левобережной Лесостепи. Интересно отметить, что классы почв, занимающие среднюю часть склона с более высокими значениями уклона поверхности, характеризовались и большей степенью варьирования используемого почвенного признака. И таким образом, можно предположить, что характер варьирования общего содержания гумуса (как прямого дешифрирующего признака ПП) является также одним из индикаторов отдельных элементов неоднородности ПП, их локализации в процессе итераций алгоритма кластерного анализа.

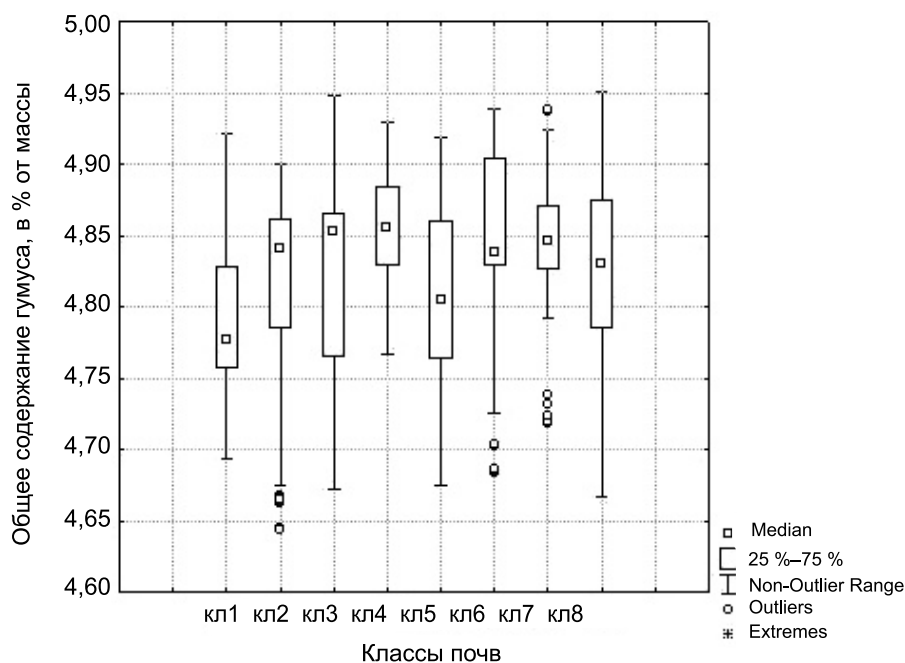


Рис. 4. Основные статистические показатели классов почв, выделенных по данным МСКС



Рис. 5. Картограмма уклонов поверхности полигона «Тишки 2» с контурами классов почв

Геостатистический экспресс анализ всех определенных почвенных показателей (данные точечного отбора), с использованием глобального индекса Морана, подтвердил на явность неоднородности в ПП полигона лишь для микроагрегатного состава почв.

В целом же, проведенный анализ результатов дискретизации локальной структуры полигона «Тишки 2» показывает, что даже в условиях слабовыраженной изменчивости прямого дешифрирующего признака почв (числовые значения общего содержания гумуса в почве), кластеризация данных МСКС с использованием алгоритма ISODATA разделила ПП полигона на отдельные контура, отличающиеся по вертикальному строению почв, занимающие вполне определенное положение на склоне, с определенной дифференциацией по солярной экспозиции и крутизне, что вполне согласуется с положениями генетического почвоведения о принципах картографирования и диагностики почв.

ВЫВОДЫ

В результате научных обобщений и многолетнего опыта использования данных МСКС высокого пространственного разрешения для изучения почв сформирована система критериев и методических подходов для всестороннего анализа результатов дискретизации ПП на локальном территориальном уровне.

Подробно изложены этапы дешифрирования данных спутника Landsat 8 и отдельные процедуры экспертного анализа результатов цифрового картографирования ПП на примере одного из исследовательских полигонов в левобережной Лесостепи Украины.

Представленный анализ результатов дискретизации локальной структуры полигона показывает, что даже в условиях слабовыраженной изменчивости прямого дешифрирующего признака почв – общего содержания гумуса, кластеризация данных МСКС с использованием алгоритма ISODATA разделила ПП полигона на отдельные контура, отличающиеся по строению почвенного профиля и занимающие определенное положение на склоне, с дифференциацией по солярной экспозиции и крутизне, что вполне согласуется с положениями генетического почвоведения о принципах картографирования и диагностики почв.

Полученные результаты актуализируют необходимость усовершенствования методов экспертного оценивания результатов цифрового картографирования локальных структур ПП на основе широкого использования аппарата геостатистики, математического и информационного моделирования и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянт, А.М. Картографический метод исследования / А.М. Берлянт. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 257 с.
2. Аковецкий, В.И. Дешифрирование снимков / В.И. Аковецкий. – М.: Недра, 1983. – 374 с.
3. Мышляков, С.Г. Дешифрирование и картографирование почв сельскохозяйственных земель по космическим снимкам сверхвысокого разрешения / С.Г. Мышляков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6, № 2. – С. 411–418.

4. Цифровая карта засоления почв Хакасии / Г.И. Черноусенко [и др.] // Почвоведение. – 2012. – № 11. – С. 1131–1138.
5. *Steven, M.D.* Applications of remote sensing in agriculture / M.D. Steven, J.A. Clark. – Elsevier, 2013. – 440 p.
6. *Kashyap, R.* Application of Remote Sensing in Soil Mapping: A Review [Электронный ресурс] / R. Kashyap, S. Borah, M. Chetia // Nort East Students Geo – Congress on Advances in Geotechnical Engineering (NES Geo-Congress 2013), 28 September 2013, Guwahat. – P. 60–66. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/309034749>.
7. *Elhag, M.* Evaluation of different soil salinity mapping using remote sensing techniques in arid ecosystems, Saudi Arabia [Электронный ресурс] / M. Elhag // Journal of Sensors. – Vol. 2016 (2016). – 8 p. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7596175>.
8. *Forkuor, G.* High resolution mapping of soil properties using remote sensing variables in South-Western Burkina Faso: a comparison of machine learning and multiple linear regression models [Электронный ресурс] / G. Forkuor, O.K.L. Hounkpatin, G. Welp, M. Thiel // Journal PLoS One. – 2017; 12(1). – Режим доступа: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170478>.
9. *Werban, U.* Digital Soil Mapping: Approaches to Integrate Sensing Techniques to the Prediction of Key Soil Properties [Электронный ресурс] / U. Werban, H. Bartholomeus, P. Dietrich, G. Grandjean, S. Zacharias // Vadose Zone J. – Режим доступа: <http://vzj.geoscienceworld.org/content/12/4/vzj2013.10.0178>.
10. *Шатохин, А.В.* Сопряженное изучение черноземов Донбасса наземными и дистанционными методами [Текст] / А. В. Шатохин, М.А. Лындин // Почвоведение. – 2001. – № 9. – С. 1037–1044.
11. *Ачасов, А.Б.* Деякі аспекти картографування чорноземів з використанням матеріалів космічного зондування / А.Б. Ачасов, С.Р. Трускавецький, М.М. Гічка // Генеза, географія та екологія ґрунтів : зб. наук. праць Львівського нац. ун-ту. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. – С. 11–16.
12. *Биндич, Т.Ю.* Аналіз інформативності даних багатоспектрального сканування для ґрунтознавчих досліджень / Т.Ю. Биндич // Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного ун-ту. – 2007. – Вип. 15, Т. 1. – С. 114–118.
13. *Трускавецький, С.Р.* Верифікації електронних карт ґрунтів, створених на основі космічної зйомки / С.Р. Трускавецький // Генеза, географія та екологія ґрунтів: зб. наук. праць Львівського нац. ун-ту. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2008. – С. 567–573.
14. *Трускавецький, С.Р.* Катенний метод верифікації електронних карт ґрунтів / С.Р. Трускавецький // Агрохімія і ґрунтознавство. – 2009. – Вип. 72. – С. 35–39.
15. *Биндич, Т.Ю.* Досвід аналізу результатів числової таксономії даних космічної зйомки для великомасштабного картографування ґрунтів / Т.Ю. Биндич // Агрохімія і ґрунтознавство. – 2011. – Вип. 76. – С. 80–89.
16. Физико-географическое районирование Украинской ССР / под ред. В.П. Попова, А.М. Маринича, А.И. Ланько. – К.: Изд-во Киевского ун-та, 1968. – 683 с.
17. Почвенная съемка: руководство по полевым исследованиям и картированию почв / отв. ред. акад. И.В. Тюрин [и др.]. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1959. – 346 с.

18. *Аринушкина, Е.В.* Руководство по химическому анализу почв / Е.В. Аринушкина. – М.: Изд-во МГУ, 1961. – 491 с.
19. *Гуревич, Б.Л.* Географическая дифференциация и ее меры в дискретной схеме / Б.Л. Гуревич // Вопросы географии. – 1968. – № 67. – С. 15–43.
20. *Сорокина, Н.П.* Пространственно-типологический подход в почвенной картографии / Н.П. Сорокина // Масштабные эффекты при исследовании почв. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – С. 114–126.
21. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ. / Дж.-О. Ким [и др.]; под ред. И.С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
22. Составление и использование детальных почвенных карт: методические рекомендации / под ред. В.М. Фридланда. – М.: изд-во почв. ин-та, 1977. – 52 с.
23. *Матерон, Ж.* Основы прикладной геостатистики / Ж. Матерон. – М.: Мир, 1968. – 408 с.
24. *Нутенко, Л.Я.* Меры качества схем членения территории / Л.Я. Нутенко // Вопросы географии. – 1971. – Вып. 88. – С. 119–136.
25. *Геренчук, К.І.* Польові географічні дослідження: навч. посіб. для студ. геогр. спец. ун-тів і пед. ін-тів / К.І. Геренчук, Е.М. Раковська, О.Г. Топчієв. – К.: Вища школа, 1975. – 248 с.
26. *Викторов, А.С.* Рисунок ландшафта / А.С. Викторов. – М.: Мысль, 1986. – 179 с.
27. Полевой определитель почв / под ред. Н.И. Полупана, Б.С. Носко, В.П. Кузьмичева. – К.: Урожай, 1981. – 320 с.
28. *Самсонова, В.П.* Использование эмпирического байесовского кригинга для выявления неоднородностей распределения органического углерода на сельскохозяйственных землях / В.П. Самсонова, Ю.Н. Благовещенский, Ю.Л. Мешалкина // Почвоведение. – 2017. – № 3. – С. 321–328.

THE MAIN ASPECTS OF THE ANALYSIS OF DIGITAL SOIL MAPPING RESULTS ACCORDING TO SPACE SURVEY DATA

T.Yu. Byndych

Summary

The article summarizes the main aspects of the analysis of digital soil maps obtained by decoding of satellite imagery data. Multi-spectral data from the Landsat 8 satellite are used for mapping and parametric description of chernozem soils in the Forest-steppe province of Ukraine: 1) to delineate soil mapping units and evaluate their spatial structure; 2) to realize quantitative estimate of the main properties of chernozem using geostatistics and multi-dimensional data processing. Comparison of the field description of soil profiles and the soil classes demonstrated the efficacy of ISODATA cluster analysis for determining different elements of the soil cover at the local territorial level. Maps of humus content, created by empirical bayesian kriging, enabled parameterisation of chernozem and further detailed analysis of the structure of humus scalar field.

Поступила 20.10.17