

Рус. УДК 631. 421

Структурное моделирование латеральной неоднородности почв по данным космической съемки

Бындыч Татьяна Юрьевна

Аннотация

Многоспектральные спутниковые данные использованы для картографирования и параметрического описания черноземных почв путем оконтуривания почвенных выделов и оценки их пространственной структуры, а также количественной оценки-содержания гумуса эродированных почв с использованием геостатистики и математического моделирования.

Ключевые слова: почвенный покров, чернозем, геоинформационные технологии, многоспектральное сканирование, неоднородность почв.

Eng. *Structural modeling of lateral soil heterogeneity using satellite surveys data*

Byndych Tatiana Yurievna

Abstract:

Multi-spectral satellite data are used for mapping and parametric description of chernozem soils to delineate soil mapping units, to evaluate their spatial structure and to quantitatively assess humus content of eroded soils using geostatistics and mathematical modelling.

Key words: soil cover, chernozem, geo-information technologies, multispectral scanning, heterogeneity of soils.

Введение. Трудно переоценить вклад В.В. Докучаева в исследование латеральной неоднородности почв. В частности, в основополагающей для научного почвоведения работе [5] В.В. Докучаев детально описывает результаты экспедиционного исследования вдоль поверхностного, пространственного распределения свойств черноземов (окраску, отдельные показатели минералогического и физико-химического состава) на значительных по площади территориях Европейской России и, фактически, устанавливает закон зональности. Страницы этой объемной научной работы в полной мере передают стремление В.В. Докучаева к созданию точной научной дисциплины, обеспечивающей изучение почвенных свойств на основе сбора, подготовки и точного анализа «почвенного материала».

Последовательное развитие докучаевских взглядов и подходов к изучению почвенного покрова (ПП) позволило многим исследователям впоследствии подчеркнуть теоретическую и практическую значимость изучения и количественного описания латеральной неоднородности почв для познания процессов почвообразования [11-12, 18, 21], картографирования структур ПП [4, 22], совершенствования систем географического и почвенного районирования [16], оптимизации мелиоративных, агрохимических и почвоохранных мероприятий [9, 14, 20, 25], организации почвенных обследований [22—27], изучения динамики почвенных свойств и структуры ПП [9-10, 17], учета

урожайности сельскохозяйственных культур и разработки систем точного земледелия [10, 21, 24], объективного оценивания качества почв [8]. Анализ публикаций позволяет сделать вывод, что дальнейшее развитие этого научного направления требует обязательного применения геоинформационного подхода, который предусматривает использование приборов системы глобального позиционирования (GPS) на полевом этапе исследований и геоинформационных систем (ГИС) в качестве технологической основы изучения латеральной неоднородности почв. Также этот подход предусматривает использование космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения в качестве информационной основы, обеспечивающей получение цифровой и собственно пространственной информации о ПП. Апробация данного подхода в исследованиях ПП пахотных земель в различных почвенно-климатических зонах Украины позволила сотрудникам лаборатории дистанционного зондирования Национального Научного Центра «Институт почвоведения и агрохимии имени А.Н. Соколовского» разработать алгоритмы обработки и интерпретации данных многоспектрального космического сканирования (МКС) почвенной поверхности, основанные на связи ее оптических характеристик с генетически обусловленными свойствами почвы – гумуса и гранулометрическим составом [19].

Детальное изучение информационных свойств космических снимков, как одной из картографических моделей земной поверхности, позволяет предположить перспективность их использования для вероятностно-статистического моделирования неоднородности ПП. Следует отметить, что метод вероятно-статистического моделирования хорошо известен в почвоведении [3, 7, 21]. Согласно недавним исследованиям В.Н. Гончарова [2], анализ распределения показателей водно-воздушного режима почв, полученных в ходе точечного отбора проб грунта и закладки почвенных разрезов, позволил определить доминирующие факторы формирования агрофизического состояния дерново-подзолистых почв Ивановской области и комплексного ПП Владимирского Ополья. Также значительный интерес представляет использование вероятностно-статистического моделирования для изучения пространственного варьирования содержания гранулометрических фракций в разновидностях каштановой почвы юго-запада Кулундинской Степи, предложенное в работах И.В. Михеевой [11], что позволило выделить три категории изменчивости почвенных свойств в зависимости от степени неоднородности факторов почвообразования (неоднородность, вариабельность и флуктуации). Однако следует признать, что использование данных крупномасштабного обследования почв, в целом, не обеспечивает получения континуально распределенной информации о почвах, что существенно снижает точность и оперативность моделирования латеральной неоднородности почв на их основе для значительных по площади территорий.

В этой связи, одним из актуальных задач современных исследований ПП является разработка более совершенных методов количественного описания и

Бындыч Т. Ю., Структурное моделирование латеральной неоднородности почв по данным космической съемки // «Живые и биокосные системы». – 2016. – № 16; URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-16/article-5>

оценивания пространственной вариабельности почвенных свойств, основанных на использовании данных космического сканирования как источника объективной и, действительно, пространственной информации о состоянии ПП.

Материалы, объекты и методы исследований. Разработка и апробация более технологичного подхода к моделированию латеральной неоднородности почв проведены на основе данных малого спутника «Сич-2», который обеспечивал съемку открытой почвенной поверхности в нескольких диапазонах спектра (0,51—0,56 мкм; 0,61—0,67 мкм; 0,80—0,89 мкм), с пространственным разрешением 8 метров [6]. Территориальным объектом выбран полигон «Розовка», отличающийся наиболее сложным рисунком космического изображения открытой почвенной поверхности, который расположен в Ясиноватском районе Донецкой области и, в соответствии с известной схемой физико-географического районирования Украины, относится к Донецкой физико-географической области Левобережно-Днепровской северо-степной провинции Северной степной подзоны [15].

Важно отметить, что в тектоническом отношении территория исследований имеет сложное строение, состоящее из комплекса отложений карбона, триаса, перми, юры, мелового периода, палеогена и антропогена. В долинах рек, в балках и оврагах эти отложения выходят на дневную поверхность, в то время как на водоразделах они покрыты лёссом, элювиально-делювиальными отложениями, на аккумулятивных террасах долин рек – аллювиальными, а иногда, и эоловыми отложениями. Это во многом объясняет значительную сложность структуры ПП этой территории и актуализирует проведение современных детальнейших или крупномасштабных почвенных обследований. Кроме этого, в орографическом отношении, поверхность этой территории относится к слабо волнистым, с плотностью овражно-балочной сети от 0,50 до 1,0 км/км². Преобладающее распространение на этой территории имеют черноземы обыкновенные различной степени гумусированности и эродированности, сформированные на лёссах и на продуктах выветривания коренных пород.

Программа исследований предусматривала последовательное проведение:

- 1) статистического анализа изображения полигона и его предварительной классификации для разработки системы опробования почв;
- 2) детального почвенного обследования ПП полигона с отбором почвенных почв с поверхностного слоя почвы (0—10 см) и морфологическим описанием почвенных разрезов;
- 3) аналитического исследования отобранных в поле образцов почвы;
- 4) экспертной оценки сложности изображения и данных полевого обследования почв как основы для структурной идентификации ПП полигона;
- 5) поиска математических моделей, описывающих взаимосвязь между оптическими характеристиками поверхности почв и её основным, наиболее стабильным, физико-химическим показателем – общим содержанием гумуса в почве;

б) создания электронной картограммы общего содержания гумуса в ПП полигона;

7) параметризации элементов неоднородности ПП полигона по общему содержанию гумуса в почве;

8) анализа варьирования исследованного почвенного показателя в ПП полигона;

9) обобщения данных и выполнения экстраполяционных процедур.

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 тематического дешифрирования данных МКС создана почвенная карта полигона, на основании которой разработана система опробования почв. Полевое обследование почв полигона проведено с использованием приборов GPS, в соответствии с действующей методикой, предусматривающей морфологическое описание почвенных разрезов и прикопок [13], а также аналитическое исследование отобранных образцов почвы.

В целом, на полигоне было заложено 7 почвенных разрезов, позволяющих идентифицировать составляющие структуры ПП полигона, а также отобраны образцы из генетических горизонтов почвенных разрезов и 55 проб из поверхностного слоя почвы (0—10 см). Во всех образцах определяли общее содержание гумуса по методу И.В. Тюрина, рН водной вытяжки – колориметрическим методом, рН солевой - компенсационным методом с помощью потенциометра, качественный состав водной вытяжки – с использованием комплексометрического, аргентометрического [1] и пламенно-фотометрического методов, состав обменных оснований по методу Шолленберга, а также гранулометрический состав и микроагрегатный состав - по методу Н.А. Качинского. Результаты аналитического исследования проб почвы составили базу данных для региона и обработаны с использованием пакета программ Statistica.

Результаты и обсуждение. Принципиальная возможность моделирования латеральной неоднородности почв на основе данных МКС высокого пространственного разрешения основана на случайной природе оптических характеристик ПП как результата получения спектральных характеристик объектов земной поверхности. Это позволяет рассматривать космическое изображение почв как случайное поле оптической плотности и обосновывает целесообразность использования для его описания математического аппарата теории вероятностей и, в частности, закона распределения как основной и наиболее полной характеристики варьирования случайной величины. Истинный закон распределения, благодаря совокупному действию различных погрешностей (конкретной измерительной системы и первичной обработки изображения), может остаться неизвестным, несмотря на все попытки его

определения. Однако на основании данных измерений и определенных теоретических рассуждений можно подобрать достоверную модель, которая наилучшим образом подходит к истинному закону распределения признака. Если модель определена как адекватная (т.е. не отклонена на основе статистических критериев), то на ее основе можно определить необходимые для исследователя вероятностные характеристики случайной величины, которые отличаются от истинных значений только за счет систематической составляющей погрешности измерений.

При таком подходе, параметризация случайной величины для классов почв, выделенных в ходе дешифрирования космического изображения, и представленная в виде подобранного закона распределения вероятностей, фактически решает вопрос о структурно-параметрической идентификации неоднородности ПП и возможности ее количественного описания и оценки.

Апробация описанного подхода к моделированию латеральной неоднородности почв проведена на основе данных МКС методом выделения элементов структуры ПП полигона и последующей параметризацией его неоднородности в пределах выделенных классов почв по показателю общего содержания гумуса, который является их прямым дешифрирующим признаком. На подготовительном этапе проведена географическая привязка космического снимка в ГИС и выделены сельскохозяйственные угодья, которые имели открытую и находящуюся в воздушно-сухом состоянии почвенную поверхность в момент съемки. Именно для этих участков (или полигонов) проанализирована вся доступная, тематическая информация, рассмотрены основные дешифровочные признаки изображения (яркость и структура), осуществлен общий статистический анализ изображения для обоснования критериев его классификации. Следует отметить, что на этом этапе контрастность изображения предположительно связывалась с интенсивностью проявления такого деградиационного процесса в почвах, как эрозия, характерного для слабоволнистых поверхностей овражно-балочного типа.

Экспертное оценивание результатов статистического анализа изображения полигона позволило сделать вывод о целесообразности его классификации на уровне 4 классов, значительно отличающихся по показателям оптической яркости открытой почвенной поверхности. Классификация изображения для создания цифровой карты-версии, представляющей пространственное расположение основных структурных элементов ПП полигона, осуществлена по методу К-средних кластерного анализа (рис.1). В ходе организации полевого этапа работ, именно эта картографическая модель ПП использовалась для разработки системы опробования почв, которая включает определение общего количества и географических координат точек отбора проб почвы с поверхности и по генетическим горизонтам почвенных разрезов.

Полевые исследования, в целом, подтвердили корректность картографической модели структуры ПП, созданной в ходе дешифрирования данных МКС, и позволили установить взаимную обусловленность признаковой

и территориальной дифференциации ПП. В частности, приуроченность почвенных контуров к отдельным элементам микрорельефа (микроплакор – склон, бровка между пологим и крутым склоном, днище ложбины стока и т.д.) интерпретировано как состоятельность предложенной модели пространственной дифференциации ПП полигона. Кроме этого, преобладающее пространственное направление вытянутых форм ареалов, выделенных в процессе дешифрирования, отразило ориентацию потоков в данной склоновой системе, а расположение отдельных контуров дифференцировано по склонам с разной соляной экспозицией и крутизной. Сделан вывод о том, что контурность построенной картографической модели ПП характеризуется определенной структурностью и конструктивностью, которая вполне согласуется с геоморфологическими особенностями полигона.

Морфологическое описание почвенных разрезов, заложенных на каждом из выделенных классов почв, также подтвердило их значимые отличия друг от друга. Разрезы значительно различались по типу почвообразующих пород, глубине вскипания и мощности гумусированной части профиля, что подтверждает значительную эффективность использования данных МКС для выделения элементов локальной структуры ПП в данном регионе.

В частности, разрез, заложенный в пределах распространения первого класса почв, диагностирован как чернозем обыкновенный слабосмытый высоковскипающий тяжелосуглинистый на легкосуглинистом лёссе, характеризующийся бурным вскипанием карбонатов от соляной кислоты в пахотном слое с общим содержанием гумуса 2,95 %, в котором мощность гумусированной части профиля составляет около 70 см.

Описание почвенных разрезов, заложенных в пределах второго класса почв, располагающихся в предбалочном понижении и в днище ложбины, представили комплекс чернозема обыкновенного мощного малогумусного, среднесуглинистого, глубоковскипающего на легкосуглинистом лёссе и его намытого аналога, характеризующихся растянутым профилем (мощностью свыше 120 см), и вскипанием от HCl в верхнем слое почвообразующей породы. Почвы являются несколько уплотненными в нижней части профиля и имеют кубовидно-призматическую структуру со слабовыраженной потечностью гумуса, что является следствием добавочного увлажнения и выщелачивания карбонатов. При этом намытый аналог этой почвы характеризуется наличием как минимум двух погребенных гумусовых горизонтов и слабовыраженной слоистостью в перераспределении гранулометрических фракций разных размеров в его верхней части.

Разрез, заложенный в пределах третьего класса почв на выпуклом склоне небольшого водораздельного повышения, представил чернозем слабосмытый малогумусный среднесуглинистый на слабозасоленной красно-бурой глине с общим содержанием гумуса в пахотном слое 2,5%. Характеризовался мощностью профиля до 45 см, крупной грубозернистой острогранной структурой в подпахотном горизонте, постепенным утяжелением

гранулометрического состава почвы с глубиной, слабой щебнистостью в нижней части профиля.

Почвенные разрезы в пределах четвертого класса почв, заложенные на пологих склонах восточной и юго-западной экспозициях, позволили диагностировать чернозем среднесмытый малогумусный тяжелосуглинистый на незасоленной элювиальной красноцветной (пермской) глине. Почва характеризуется укороченным профилем (30 см), с выходом на поверхность верхнего переходного горизонта темно-серой окраски с красноватым оттенком зернисто-комковатой структуры, плотного, с общим содержанием гумуса до 1,5%, имеет постепенный переход к нижнему переходному горизонту красно-



Условные обозначения:



1 – Чернозем обыкновенный слабосмытый
высоковскипающий тяжелосуглинистый на легкосуглинистом
лессе



2 – Комплекс чернозема обыкновенного мощного
малогумусного среднесуглинистого глубоковскипающего на
легкосуглинистом лессе и его намытого аналога



3 – Чернозем слабосмытый малогумусный
среднесуглинистый на слабозасоленной красно-бурой глине



4 – Чернозем среднесмытый малогумусный
тяжелосуглинистый на незасоленной элювиальной
красноцветной (пермской) глине

Рис.1 – Картосхема основных элементов структуры почвенного покрова полигона «Розовка», созданная по данным космической съемки

бурого цвета, среднеглинистому, плотному с крупно-ореховато-призмовидной структурой с включениями плотного плитчатого песчаника с характерным раковистым изломом.

На основе результатов статистического анализа всего массива количественной информации, полученной в результате аналитических исследований проб почвы, сделан вывод о достоверности и высокой тесноте связи между оптической яркостью почвенной поверхности в инфракрасном диапазоне спектра и общим содержанием гумуса в почве. Учитывая их значительную корреляцию ($r^2 = -0,76$), космическое изображение полигона в этом диапазоне использовано для расчета региональной математической модели экспоненциального типа, позволяющей в ГИС рассчитать значения параметров этого почвенного показателя для каждого элемента изображения и получить электронную карту метризованного свойства почвы для полигона (рис.2). На этом этапе исследований проведена также верификация полученной картограммы, с использованием 20% экспериментальных данных в качестве контрольной выборки, не участвующих при расчете математической модели. При этом, критерием точности определения выбрано отклонение расчетных значений (то есть полученных с использованием математической модели) не более чем на 10% от аналитически определенных (что соответствует точности определения данного почвенного показателя по методу Тюрина).



Рис.2 – Картограмма общего содержания гумуса в почвах полигона «Розовка» (с примером идентификации его значения для отдельного элемента изображения)

Полученная таким образом цифровая карта рассматривалась как фрагмент непрерывного скалярного поля общего содержания гумуса в почве, основной характеристикой которого является его изменчивость в пространстве. На следующем этапе исследований проанализированы количественные значения общего содержания гумуса для каждого класса почв. Полученные данные использованы для построения гистограммы, анализ которой позволяет определить закон распределения, который наилучшим образом аппроксимирует количественные значения почвенного показателя для каждого из классов почв. Отметим, что в ходе анализа использованы основные процедуры вероятностно-статистического моделирования:

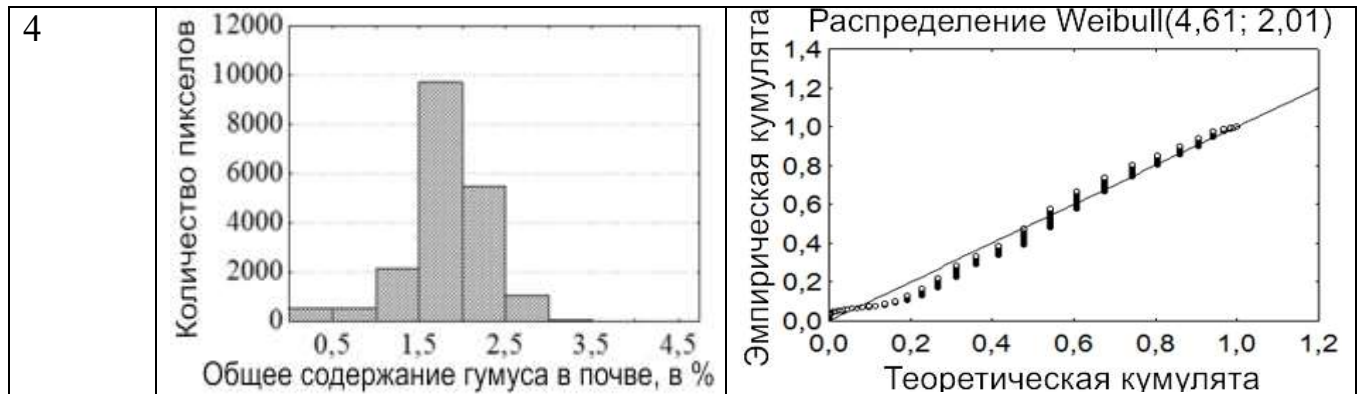
- а) проверка распределения признака на соответствие закону нормального распределения;
- б) подгонка экспериментального распределения и определение вида функций вероятностных распределений, которые наиболее близко описывают статистическое распределение метризованного показателя почвы путем сопоставления с известными функциями распределений (нормального, Вейбула, логнормального, Коши, семейства Джонсона, семейства экспоненциальных, экстремальных значений, бета-распределения и т.д.);
- в) оценивание статистик параметрических и непараметрических критериев (критерий χ^2 Пирсона, критерий отношения правдоподобия, критерий Колмогорова);
- г) экспертное оценивание совокупности значений использованных критериев для определения лучшего вида распределения, при котором достигнуто максимальное значение вероятности.

При этом технологической основой анализа скалярных полей почвенных свойств также являются аналитические процедуры использованных ГИС, позволяющие в полуавтоматическом режиме применять комплекс методов по обработке пространственной информации, а также программные пакеты для статистико-математической обработки данных (Statistica, Matlab и т.д.). Идентификация математических функций вероятностно-статистических распределений, проведенная методом перебора многих видов функций распределения, практически обеспечила однозначный выбор функций, которые наиболее близко аппроксимируют варьирование значения общего содержания гумуса для каждого из выделенных классов почв. Для наглядности представления результатов выбора лучшего соответствия распределения почвенного показателя к конкретному типу теоретического распределения использованы вероятностные графики (таблица 1, графа 3). Напомним, что на этих графиках лучшее соответствие представляется в виде полного совпадения или чрезвычайной близости точек, представляющих данные эмпирического

распределения, к диагонали графика (имеющей нулевое значение и уклон 1), которая представляет значения признака для конкретного типа теоретического распределения (тип распределения указан над графиком в графе 3). Установлено, что пространственное варьирование общего содержания гумуса в черноземе обыкновенном слабосмытом высококовскипающем тяжелосуглинистом на лёссе (класс 1 на рис.1) и в черноземе обыкновенном мощном малогумусном

Таблица 1 – Определение типа вероятностных распределений, описывающих общее содержание гумуса в почвах полигона «Розовка»

Класс почв	Гистограмма распределения показателя для каждого из выделенных классов почв	Графическое представление наилучшего соответствия экспериментального распределения показателя теоретическому закону
1	2	3
1		<p>Распределение Beta(2,1902; 1,5712)</p>
2		<p>Распределение Beta(1,557; 1,51)</p>
3		<p>Распределение Normal (1,21601; 0,315866)</p>



глубоковскипахующем на легкосуглинистом лессе (класс 2 на рис.1) хорошо описывается Бета-распределением – $Be(\alpha, \beta)$. Пространственная вариабельность исследуемого показателя почв в черноземе слабосмытом малогумусным среднесуглинистом на слабозасоленной красно-бурой глине (класс 3 на рис.1) хорошо описывается нормальным законом распределения – $N(\mu, \sigma^2)$, а в черноземе среднесмытом малогумусном тяжелосуглинистом на незасоленной элювиальной красноцветной (пермской) глине (класс 4 на рис.1) – типом распределения Вейбула – $W(k, \lambda)$.

Определение упомянутых типов вероятностно-статистических моделей распределения общего содержания гумуса в почвах обосновывает целесообразность использования робастных оценок для параметризации неоднородности элементов локальной структуры ПП по данному почвенному показателю (рис.3). Анализ оценок пространственного варьирования параметров данного почвенного свойства, в целом, доказывает различимость выделенных классов почв по медиане и межквартильному расстоянию, что в количественном представлении составляет около 1,0 % и 0,5 % гумуса соответственно. Сопоставление робастной оценки σ позволило установить переходное положение ареала чернозема среднесмытого малогумусного на незасоленной элювиальной красноцветной (пермской) глине (класс 4 на рис.1), который характеризуется наибольшей изменчивостью по общему содержанию гумуса (около 2,0 % гумуса) и наибольшим межквартильным размахом (0,8 %), перекрывающим интервал значений общего содержания гумуса для второго и третьего классов.

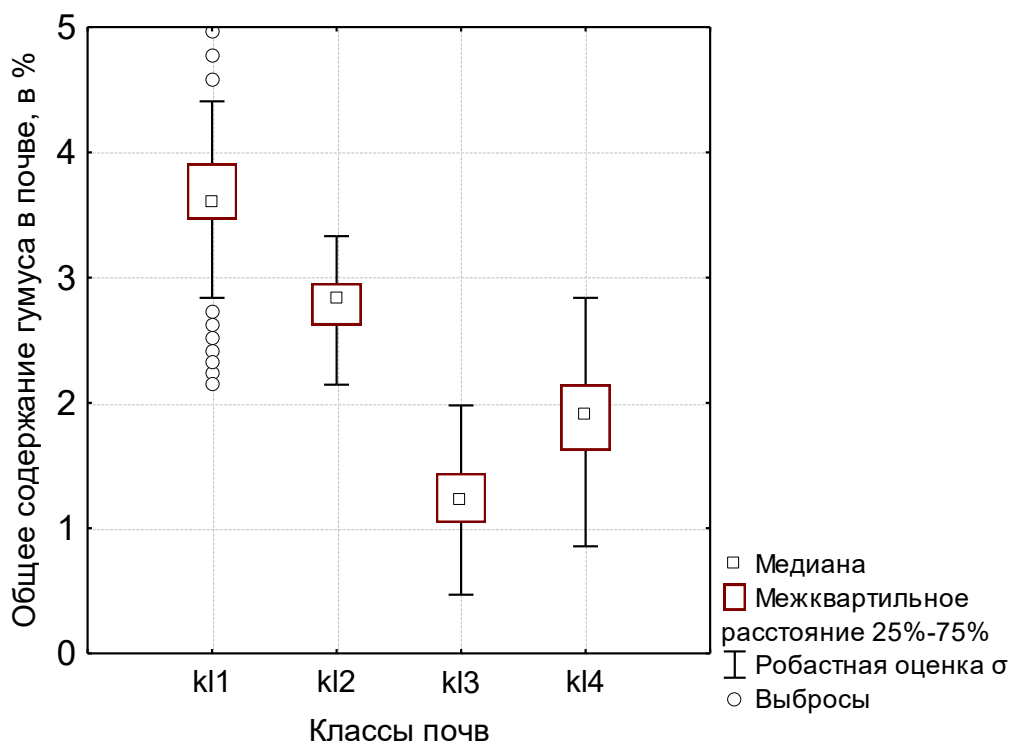


Рис.3- Количественные оценки элементов неоднородности почв полигона «Розовка» по общему содержанию гумуса в почвах

Заключение. Исследования показали достаточную эффективность использования данных МКС высокого пространственного разрешения для выделения элементов локальной структуры ПП в условиях Северной степи Украины. Морфологическое описание почвенных разрезов, заложенных в пределах каждого из выделенных классов почв, подтвердило их значимое отличие по типу почвообразующих пород, мощности гумусированного слоя, глубине вскипания, а также по степени эродированности.

Наличие высокой корреляционной зависимости между оптической яркостью открытой почвенной поверхности в инфракрасном диапазоне сканирования с общим содержанием гумуса в почве позволило посредством расчета региональной математической модели экспоненциального типа использовать космический снимок для создания картограммы этого почвенного показателя для ПП полигона.

Использование основных процедур вероятностно-статистического моделирования в ходе анализа количественных значений почвенного показателя для каждого из выделенных классов почв обеспечило выбор функций распределения, которые наиболее близко аппроксимируют пространственное варьирование признака для каждого из почвенных выделов.

Результаты исследований обосновывают целесообразность использования вероятно-статистических моделей и робастных оценок параметров латеральной неоднородности почв по общему содержанию гумуса в почве в качестве дополнительного метода, повышающего точность экстраполяционных процедур в процессе дистанционной диагностики почв и их мониторинга по данным МКС.

Список литературы

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1961. 491с.
2. Гончаров В.Н. Использование методов математического моделирования при агрофизической оценке почвенного покрова // Вест. Оренбург.гос.ун-та. 2008. №10 (92). С.161—167.
3. Дмитриев Е.А., Манучаров А.С. К объяснению причин ассиметрии в распределении водопроницаемостей //Почвоведение. 1968. №7. С.93—102.
4. Дмитриев Е.А. О почвенных границах и элементах организации почвы // Почвоведение. 1994. №5. С.5—13.
5. Докучаев В.В. Русский чернозем. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. Т.3. С.23—528.
6. Космічна система «СІЧ-2»: завдання та напрями використання //Официальный сайт Национального космического агентства Украины [Электронный ресурс]: Свободный доступ на http://www.nkau.gov.ua/pdf/SICH2_small.pdf
7. Махлин Т.Б. Аппроксимация кривыми Джонсона распределения элементов вещественного состава // Почвоведение. 1973. №6. С.123—130.

8. Медведев В.В., Плиско И.В. Бонитировка и качественная оценка пахотных земель Украины. Харьков: Изд-во «13 типография», 2006. 386 с.
9. Медведев В.В., Мельник А.И. Неоднородность агрохимических показателей почвы в пространстве и времени // *Агрохимия*. 2010. №1. С.20—26.
10. Медведев В.В. Неоднородность почв и точное земледелие. Часть.1 Введение в проблему. Харьков: Изд-во «13 типография», 2007. 296 с.
11. Михеева И.В. Изменение вероятностных распределений фракций гранулометрического состава каштановых почв Кулундинской степи под воздействием природных и антропогенных факторов // *Почвоведение*. 2010. №12. С.1456—1467.
12. Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: На примере дерново-подзолистых почв. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. 160 с.
13. Почвенная съемка: Руководство по полевым исследованиям и картированию почв. Москва: Изд-во АН СССР, 1959. 200 с.
14. Тюлин В.А., Иванов Д.А., Петрова Л.И., Саликов Р.А. Продуктивность сельскохозяйственных культур в различных микроландшафтах // *Системы земледелия*. 2000. № 2. С.18—19.
15. Физико-географическое районирование Украинской ССР / Под ред. В.П. Попова, А.М. Маринича, А.И. Ланько. Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1968. 683 с.
16. Флория Н. Почвенные комбинации, педиомы, педиторы как основные уровни организации почвенного покрова, их связь с решением проблемы районирования // *Почвоведение*. 1994. № 7. С.25—28.
17. Фрид А.С. Пространственное варьирование и временная динамика плодородия почв в длительных полевых опытах. М.: Россельхозакадемия, 2002. 80 с.
18. Фридланд В.М. Проблемы географии, генезиса и классификации почв. М.: Наука, 1986. 245 с.
19. Шатохин А.В., Лындин М.А. Сопряжённое изучение чернозёмов Донбасса наземными и дистанционными методами // *Почвоведение*. 2001. № 9. С. 1037—1044.
20. Basic I.L.Z., Rossiter D.G., Bregt A.K. Using spatial information to improve collective understanding of shared environmental problems at watershed level // *Quelle Landscape and Urban Planning*. 2006. Vol. 77 (1—2). P.54—66.
21. Beckett P.H.N. Lateral changes in soil variability // *J.Austral.Inst. Agric. Sci.* 1967. V.33. №3. P. 964—971.
22. Digital soil property mapping and uncertainty estimation using soil class probability rasters Nathan P. Odgers, Alex B. McBratney, Budiman Minasny. *Geoderma* 237–238 (2015) 190–198.
23. Fasching R.A. Soil Sampling for Variable Rate Fertilizer Application // *Agronomy Technical Note*. 2007. No. 80.5. P.1—5.

24. Gasch C.K., Huzurbazar S.V., Stahl P.D. Small-scale spatial heterogeneity of soil properties in undisturbed and reclaimed sagebrush steppe //Soil and Tillage Research.2015. Vol.153.P.42—47.
25. Mason B.J. Preparation of Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies.-U.S.Environmental Protection Agency. Las Vegas, Nevada, 1992.169 p.
26. Rossiter D.G. Digital soil resource inventories: status and prospects// Soil Use and Management. 2004. Vol. 20. P.296—301.
27. Schnug E., Miuphy D., Evans E., Haneklaus S. Yield mapping and application of yield maps to computer-aided local resource management //Soil Specific Crop Management. 1993. P.87—93.

Spisok literatury

1. Arinushkina E.V. Rukovodstvo po ximicheskomu analizu pochv. M.: Izd-vo MGU, 1961. 491s.
2. Goncharov V.N. Ispol'zovanie metodov matematicheskogo modelirovaniya pri agrofizicheskoy ocenke pochvennogo pokrova // Vest. Orenbur.gos.un-ta. 2008. №10 (92). S.161—167.
3. Dmitriev E.A., Manucharov A.S. K ob'yasneniyu prichin assimetrii v raspredelenii vodopronicaemostej //Pochvovedenie. 1968. №7. S.93—102.
4. Dmitriev E.A. O pochvennyx granicax i e'lementax organizacii pochvy // Pochvovedenie. 1994. №5. S.5—13.
5. Dokuchaev V.V. Russkij chernozem. M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1949. T.3. S.23—528.
6. Kosmichna sistema «SICH-2»: zavdannya ta napryami vikoristannya //Oficial'nyj sajt Nacional'nogo kosmicheskogo agentstva Ukrainy [E'lektronnyj resurs]: Svobodnyj dostup na http://www.nkau.gov.ua/pdf/SICH2_small.pdf
7. Maxlin T.B. Approksimaciya krivymi Dzhonsona raspredeleniya e'lementov veshhestvennogo sostava // Pochvovedenie. 1973. №6. S.123—130.
8. Medvedev V.V., Plisko I.V. Bonitirovka i kachestvennaya oценка paxotnyx zemel' Ukrainy. Xar'kov: Izd-vo «13 tipografiya», 2006. 386 s.
9. Medvedev V.V., Mel'nik A.I. Neodnorodnost' agroximicheskix pokazatelej pochvy v prostranstve i vremeni // Agroximiya. 2010. №1. S.20—26.
10. Medvedev V.V. Neodnorodnost' pochv i tochnoe zemledelie. Chast'.1 Vvedenie v problemu. Xar'kov: Izd-vo «13 tipografiya», 2007. 296 s.
11. Mixeeva I.V. Izmenenie veroyatnostnyx raspredelenij frakcij granulometricheskogo sostava kashtanovyx pochv Kulundinskoj stepi pod vozdejstviem prirodnyx i antropogennyx faktorov // Pochvovedenie. 2010. №12. S.1456—1467.
12. Samsonova V.P. Prostranstvennaya izmenchivost' pochvennyx svojstv: Na primere dernovo-podzolistyx pochv. – M.: Izdatel'stvo LKI, 2008. 160 s.

13. Pochvennaya s'emka: Rukovodstvo po polevym issledovaniyam i kartirovaniyu pochv. Moskva: Izd-vo AN SSSR, 1959. 200 s.
14. Tyulin V.A., Ivanov D.A., Petrova L.I., Salikov R.A. Produktivnost' sel'skoxozyajstvennyx kul'tur v razlichnyx mikrolandshaftax // Sistemy zemledeliya. 2000. № 2. S.18—19.
15. Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie Ukrainskoj SSR / Pod red. V.P. Popova, A.M. Marinicha, A.I. Lan'ko. Kiev: Izd-vo Kievskogo un-ta, 1968. 683 s.
16. Floriya N. Pochvennye kombinacii, peditomy, peditory kak osnovnye urovni organizacii pochvennogo pokrova, ix svyaz' s resheniem problemy rajonirovaniya // Pochvovedenie. 1994. № 7. S.25—28.
17. Frid A.S. Prostranstvennoe var'irovanie i vremennaya dinamika plodorodiya pochv v dlitel'nyx polevyx opytax. Moskva: Rossel'xozakademiya, 2002. 80 s.
18. Fridland V.M. Problemy geografii, genezisa i klassifikacii pochv. M.: Nauka, 1986. 245 s.
19. Shatovin A.V., Lyndin M.A. Sopryazhyonnoe izuchenie chernozyomov Donbassa nazemnymi i distancionnymi metodami // Pochvovedenie. 2001. № 9. S. 1037—1044.
20. Bacic I.L.Z., Rossiter D.G., Bregt A.K. Using spatial information to improve collective understanding of shared environmental problems at watershed level // *Quelle Landscape and Urban Planning*. 2006. Vol. 77 (1—2). P.54—66.
21. Beckett P.H.N. Lateral changes in soil variability // *J. Austral. Inst. Agric. Sci.* 1967. V.33. №3. R. 964—971.
22. Digital soil property mapping and uncertainty estimation using soil class probability rasters Nathan P. Odgers, Alex B. McBratney, Budiman Minasny. *Geoderma* 237–238 (2015) 190–198.
23. Fasching R.A. Soil Sampling for Variable Rate Fertilizer Application // *Agronomy Technical Note*. 2007. No. 80.5. R.1—5.
24. Gasch C.K., Huzurbazar S.V., Stahl P.D. Small-scale spatial heterogeneity of soil properties in undisturbed and reclaimed sagebrush steppe // *Soil and Tillage Research*. 2015. Vol.153. P.42—47.
25. Mason B.J. Preparation of Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies.-U.S.Environmental Protection Agency. Las Vegas, Nevada, 1992. 169 r.
26. Rossiter D.G. Digital soil resource inventories: status and prospects // *Soil Use and Management*. 2004. Vol. 20. R.296—301.
27. Schnug E., Miuphy D., Evans E., Haneklaus S. Yield mapping and application of yield maps to computer-aided local resource management // *Soil Specific Crop Management*. 1993. P.87—93.