

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ, ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 528.925; 519.257; 631.415

ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЛАЖНОСТИ И КИСЛОТНОСТИ ПОЧВ



Н.В. Клебанович, А.Л. Киндеев, А.А. Сазонов

Белорусский государственный университет, Республика Беларусь, Минск

Рассмотрен один из способов прямого почвенного картографирования кислотности и влажности почвы на опытных участках, базирующийся на методах геостатистики. Показана важность первичной статистической обработки информации, а также отражены основные этапы геостатистического подхода в целом. Определены основные детерминированные тренды анизотропии свойств. При помощи вариограммного анализа получено представление о степени варьирования изучаемых свойств на разных иерархических уровнях общей неоднородности участков, а также количественная оценка точности картограмм. Дана сравнительная характеристика итоговых картограмм, построенных разными способами интерполяции. Рассмотрены причины и следствия пространственного распределения кислотности и влажности на исследуемых участках.

Ключевые слова: геостатистика, неоднородность почвенных свойств, вариография, влажность, кислотность

Введение

В конце XIX в., наряду со становлением генетического почвоведения, усилиями В.В. Докучаева и его учеников была доказана необходимость исследования пространственной вариабельности почв и заложены основы почвенного картографирования. На протяжении XX в. почвоведение обогащалось новыми теориями и научными направлениями, изучающими те или иные предметные области науки.

Одним из таких направлений является концепция структуры почвенного покрова, изложенная В.М. Фридландом в его одноименном труде в 1972 г. Согласно этой концепции, на картах в виде дискретных ареалов отражаются типизированные почвенно-географические единицы разных уровней организации: элементарные почвенные ареалы (ЭПА), элементарные почвенные структуры, мезоструктуры [Фридланд, 1972]. Они составляют основу для различных специальных карт прикладной направленности: агроэкологических, мелиоративных, лесохозяйственных и других.

Наряду с картированием неоднородности почвенного покрова в целом, значительное внимание уделялось выявлению пространственных закономерностей распределения отдельных почвенных свойств. Значительным шагом в этом направлении является начало цифрового почвенного картографирования (ЦПК) в 1980-е гг. На сегодняшний день существуют две группы методов ЦПК, которые можно разделить на косвенные и прямые.

Косвенные методы основываются на так называемых почвенно-ландшафтных связях, т.е. знаниях о взаимосвязи почв с факторами почвообразования. В свою очередь прямые методы базируются на точечных полевых исследованиях или на результатах прямого дешифрирования почв по данным аэрокосмической съемки.

Прямые методы составления почвенных карт используются при картографировании почв в детальном и крупных масштабах. Эти методы достаточно затратны и трудоемки, поэтому составленные прямыми методами почвенные карты в настоящее время имеются лишь на небольшие территории. С началом XXI в. было разработано специальное оборудование, которое значительно уменьшает трудоемкость и финансовые затраты пробоотбора и обработки результатов.

Так, в Швеции для отбора образцов используется специальная машина – ManagerTM, позволяющая в промышленных масштабах автоматически отбирать образцы [Cambardella et al., 1994]. В США для получения информации о кислотности почвы был разработан прибор Veris MSP, который представляет собой систему датчиков, способных адаптироваться под почвенные и погодные условия конкретных территорий [Lund et al., 2007].

Прямые методы картографирования почв более объективны и точны, и в будущем вся территория планеты будет покрыта почвенными картами, составленными на основе прямых методов [Сорокина, Козлов, 2009].

Основным толчком развития прямых методов картографирования почв является внедрение в 1980-х гг. геостатистического подхода в почвоведение, который предполагает: непрерывность в пространстве, переменные как результат случайного процесса, нахождение процесса в неподвижном состоянии при движении от точки к точке и описание вариации этих процессов в терминах пространственной зависимости. Геостатистика явилась альтернативой классификации для представления пространственных изменений и активно применяется за рубежом в «точном земледелии», оценке загрязнения и восстановлении нарушенных земель и т.п. [Olfs et al., 2010; Демьянов, Савельева, 2010].

Актуальность изучения геостатистических методов и применение их на практике в почвенно-географических изысканиях имеют место как с экономической, так и научной точек зрения. С одной стороны, без детального учета неоднородности почвы, который может предоставить геостатистика, сельскохозяйственные предприятия, например, теряют большое количество материальных и финансовых ресурсов. С другой стороны, геостатистика является существенным дополнением к классической географии почв, но до сих пор не был разработан понятийный аппарат, позволяющий адекватно отражать как закономерности структуры почвенного покрова, так и внутриклассовую вариабельность почв, что и является одним из направлений исследований геостатистики в почвоведении.

В основе геостатистического подхода при изучении пространственной вариабельности почвенных свойств лежит алгоритм, включающий в себя статистическую обработку данных, построение и анализ математических моделей (вариограмм) и описывающий пространственную вариацию, на основании которой проводится геостатистическое моделирование и строятся итоговые картограммы.

В целом геостатистический анализ требует определенного времени, формальное использование современных пакетов программ, например ArcGIS, позволяющих автоматически проводить интерполяцию данных, может дать искаженные результаты. Так, М.А. Oliver и R. Webster пишут, что необдуманное «нажатие нескольких кнопок» может привести к ненадежным и даже ошибочным результатам. Эти авторы достаточно подробно описали методологию вычисления и моделирования вариограмм и кригинга, указали условия, необходимые для их реализации [Oliver, Webster, 2014].

Целью нашего исследования является изучение пространственной вариабельности кислотности и влажности почвы на опытных участках при помощи геостатистических методов исследования, обоснование их применения при построении картограмм изучаемых свойств, а также определение степени воз-

действия антропогенного фактора на гетерогенность исследуемых свойств.

Объекты и методика исследований

Объектами исследования послужили два опытных участка, заложенных на территории Воложинского района Минской области, в окрестностях учебной географической станции «Западная Березина» и представленных лесным массивом площадью 3,8 га, с которого было отобрано 30 образцов, и примыкающим к лесу участком пахотных земель площадью 5,9 га, где было отобрано 37 образцов.

В процессе пробоотбора содержание влаги в почве определялось при помощи электронного цифрового измерителя влажности «МГ-44», значения pH в KCl были получены потенциометрически в лаборатории. Экспериментальные данные были занесены в таблицы Excel, далее произведена их статистическая обработка: определение степени нормальности распределения и корреляционных зависимостей между показателями. Данная процедура является важным этапом геостатистического анализа в связи с высокой чувствительностью вариограмм к степени нормальности распределения данных и, как следствие, сильно влияет на итоговую картограмму.

В случае нормального или близкого к нормальному распределения данные могут быть загружены в ArcGIS ArcMap и при помощи модуля Geostatistical Analyst использованы для их углубленного изучения, проведения кригинг-процедур и построения картограмм. Если же данные не имеют нормального распределения, то тот же модуль Geostatistical Analyst предоставляет ряд процедур по их преобразованию, например логарифмирование и др. Основные статистические параметры влажности и кислотности опытных участков приведены в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Первичное представление об отсутствии лево- или правостороннего отклонения дает сходство значений моды, медианы и среднего, т.е. на участке № 1 по влажности эти показатели практически равны (12,8 и 13,2 соответственно). В свою очередь, по кислотности разбежка значений более существенна и составляет 0,85 между модой и средним, что говорит о возможном наличии отклонения графика. Сила и сторона отклонения определяются коэффициентом асимметрии и его предельным значением ($\pm 0,55$) – отрицательное значение говорит о левостороннем отклонении, положительное – о правостороннем. Исходя из этого, данные по влажности не имеют отклонений (0,09), а ряд данных по кислотности имеет незначительную правостороннюю асимметрию (0,81).

Обратная ситуация наблюдается по показателю эксцесса, отражающего вытянутость графика плот-

ности реального распределения в сравнении с нормальным распределением [Байков и др., 2012]. Наличие положительного эксцесса означает, что в изучаемой массе явлений существует слабо варьирующее по данному признаку «ядро», при существенном отрицательном такого «ядра» нет совсем.

В данном случае у кислотности значение эксцесса находится в рамках нормального распределения ($-0,41$), а у влажности незначительно превышает свое критическое значение ($1,18$), что говорит о нормальной вытянутости графика по кислотности и приближенному к нормальному по влажности.

Таблица 1

Статистические параметры опытных участков

Table 1

Statistical parameters of experimental sites

Показатель	Лес (№ 1)		Поле (№ 2)	
	Влажность	pH	Влажность	pH
Кол-во образцов	30		37	
Дисперсия	14,3	1,10	28,9	0,29
Коэффициент вариации	28,8%	17,81%	36,3%	8,6%
Асимметрия	0,09	0,81	-1,30	-0,13
Эксцесс	1,18	-0,41	-0,69	0,49
Предельное значение А	0,55		0,52	
Предельное значение Э	0,97		0,90	
Мода	12,8	5,03	21,8	6,36
Медиана	12,8	5,59	13,5	6,34
Среднее	13,2	5,88	14,8	6,29
Ср. кв. отклонение	3,78	1,05	5,38	0,54
Среднее H^+		5,37E-06		1,00E-06
Ср. кв. отклонение H^+		6,06604E-06		1,31712E-06
Дисперсия H^+		3,67968E-11		1,73482E-12
Коэффициент вариации H^+		112,9%		131,4%
Коэффициент корреляции	-0,18		-0,03	

Анализируя степень варьирования данных, можно говорить, что на лесном участке влажность имеет больший разброс значений (28,8 %), нежели кислотность, измеряемая в pH в KCl (17,8 %). Но, как показывают предыдущие исследования [Киндеев, 2017; Клебанович, Киндеев, 2018], из-за того, что значения pH являются отрицательным логарифмом концентрации ионов H^+ , нивелируется реальный разброс значений. Исходя из этого был рассчитан коэффициент вариации для концентрации ионов H^+ , который составил 112,9 %, что говорит об очень высокой степени варьирования показателя. Это также подтверждается большой разницей между минимальным и максимальным значением pH и присутствием восьми групп кислотности почвы.

Опытный участок пашни (№ 2) характеризуется более значительной разбежкой между значениями моды, медианы и среднего (21,8; 13,5 и 14,8 соответственно) по влажности. Аналогичные показатели у кислотности отличий практически не имеют и находятся в диапазоне от 6,29 (среднее) до 6,36 (мода). Эти показатели дают возможность предполагать, что ряд данных значений влажности имеет асимметрич-

ное распределение, что доказывается коэффициентом асимметрии ($-1,3$), который превышает свое критическое значение ($\pm 0,52$) и показывает левостороннее отклонение данных. Значение эксцесса у влажности равняется $-0,69$ и не превышает критическое ($\pm 0,90$). У кислотности данные показатели не превышают свои допустимые пределы и подтверждают отсутствие каких-либо отклонений ряда данных от нормального распределения.

Значения коэффициента вариации у влажности и кислотности на участке № 2 имеют еще более значительные отличия между собой. Так, влажность по значению коэффициента вариации (36,3 %) можно отнести к группе средней неоднородности значений (30–60 %), в свою очередь, варьирование значений pH в KCl можно оценить как однородное (менее 30 %). Но если по коэффициенту вариации для значений pH участок № 1 имеет более сильную дифференциацию значений, нежели участок № 2, то по варьированию концентрации H^+ можно наблюдать обратную ситуацию – варьирование H^+ на полевым участке выше.

Оба изучаемых параметра на исследуемых участках не имели сопряженности по варьированию в

пространстве, несущественный коэффициент корреляции между влажностью и кислотностью подтверждает тезис о том, что взаимосвязь между ними присутствует только на почвах избыточного увлажнения [Клебанович, Киндеев, 2018].

В целом полученные результаты говорят о нормальном распределении данных по кислотности на двух участках и наличии незначительного отклонения от нормального распределения ряда данных значений влажности на участках № 1 и 2, что учтено на следующих этапах анализа пространственного распределения изучаемых свойств.

Дальнейшая обработка данных при геостатистическом подходе предполагает изучение пространственной направленности варьирования (анизотропии), вариографии и построение итоговых картограмм. Дальнейший анализ данных предполагает определение трех основных компонент, из которых состоит общая неоднородность исследуемых свойств.

Макрокомпонента отражает низкочастотные изменения, связанные с особенностями ландшафта или антропогенным воздействием, и проявляется в виде тренда. Мезокомпонента описывает изменения в пределах исследуемого участка и представляет собой наибольший практический интерес и, в отличие от макрокомпоненты, не может быть описана детерминированной зависимостью. Микрокомпонента характеризует случайную вариабельность, вызванную микромасштабной изменчивостью структурных, физико-химических и химических свойств почвы, а также случайными ошибками измерений [Якушев и др., 2010].

Принято считать, что микрокомпонента является некоррелированным «шумом» с неизменной в пределах поля дисперсией, и количество выражается через значения одного из основных параметров вариограммы – самородка [Матерон, 1952; Oliver, Webster, 2007].

Для выявления макрокомпоненты определяется анизотропия исследуемых свойств, под которой понимается различие в их пространственной вариации в зависимости от направления. Таким образом, направленность анизотропии, называемая трендом, является детерминированным компонентом поверхности, который можно выразить математической формулой.

Линия наилучшего соответствия (полином) проведена через проецируемые точки, показывая тренды в определенных направлениях (рис. 1). Если бы линии были параллельны осям X (зеленая линия) или Y (синяя линия), это означало бы, что трендов нет. Но на рис. 1 видно, что светло-зеленая линия, отражающая направление запад–восток на участке № 1 у значений кислотности, начинается с повышенных значений и понижается по направлению к центру оси X, а затем повышается, образуя перевернутую U-образную форму.

В свою очередь, полином значений влажности также образует U-образную форму по направлению с запада на восток, но имеет выпуклую форму, что говорит об увеличении значений влажности в центре участка. Синяя линия, отражающая направление юг–север, начинается с высоких значений кислотности на юге и после достижения центра оси Y плавно снижается к северной части участка. Значения влажности, как и по направлению с запада на восток, имеют прямо противоположную форму полинома – начинаясь с низких значений на севере, плавно увеличиваются к югу.

На исследуемом участке № 2 у значений кислотности прослеживается также тренд по направлению запад–восток, но, в отличие от первого участка, до центра оси X значения изменяются незначительно, а затем резко возрастают. По направлению север–юг значения кислотности на участке № 2 повторяют тенденцию значений кислотности в направлении, аналогичном участку № 1. В свою очередь, значения влажности имеют ярко выраженное повышение с запада на восток, а также с юга на север.

Для значений влажности и кислотности на исследуемых участках полиномы направлений имеют разные формы, это говорит об отсутствии общего тренда во всех направлениях и о различиях между значениями пространственной автокорреляции (полудисперсии) в разных направлениях, т.е. о наличии анизотропии.

Исходя из анализа анизотропии, удалось выявить наличие трендов, характеризующихся полиномом второго порядка, и определить ее направление для изучаемых свойств почвы на исследуемых участках, которая должна будет учитываться при подборе экспериментальной вариограммы.

В результате удаления трендов вариограммы станут моделями пространственной автокорреляции между точками данных без рассмотрения трендов в данных. Это позволяет отдельно оценить долю мезо- и микрокомпоненты пространственной неоднородности исследуемых участков. Тренды будут автоматически включены обратно в расчеты перед созданием результирующей поверхности.

При построении итоговых картограмм для удаления имеющихся трендов был использован ординарный кригинг с преобразованием второго порядка, который соответствует U-образной форме полинома (см. рис. 1). Для приведения к нормальному распределению значений влажности участка № 2 было произведено логарифмирование значений. При подборе экспериментальных моделей к эмпирическим для свойств исследуемых участков выяснилось, что классические модели, такие как гауссова, экспоненциальная или круговая, значительно отличаются от эмпирической вариограммы. В связи с этим при помощи визуального сходства было решено использовать довольно редкую модель J-Бесселя (рис. 2).

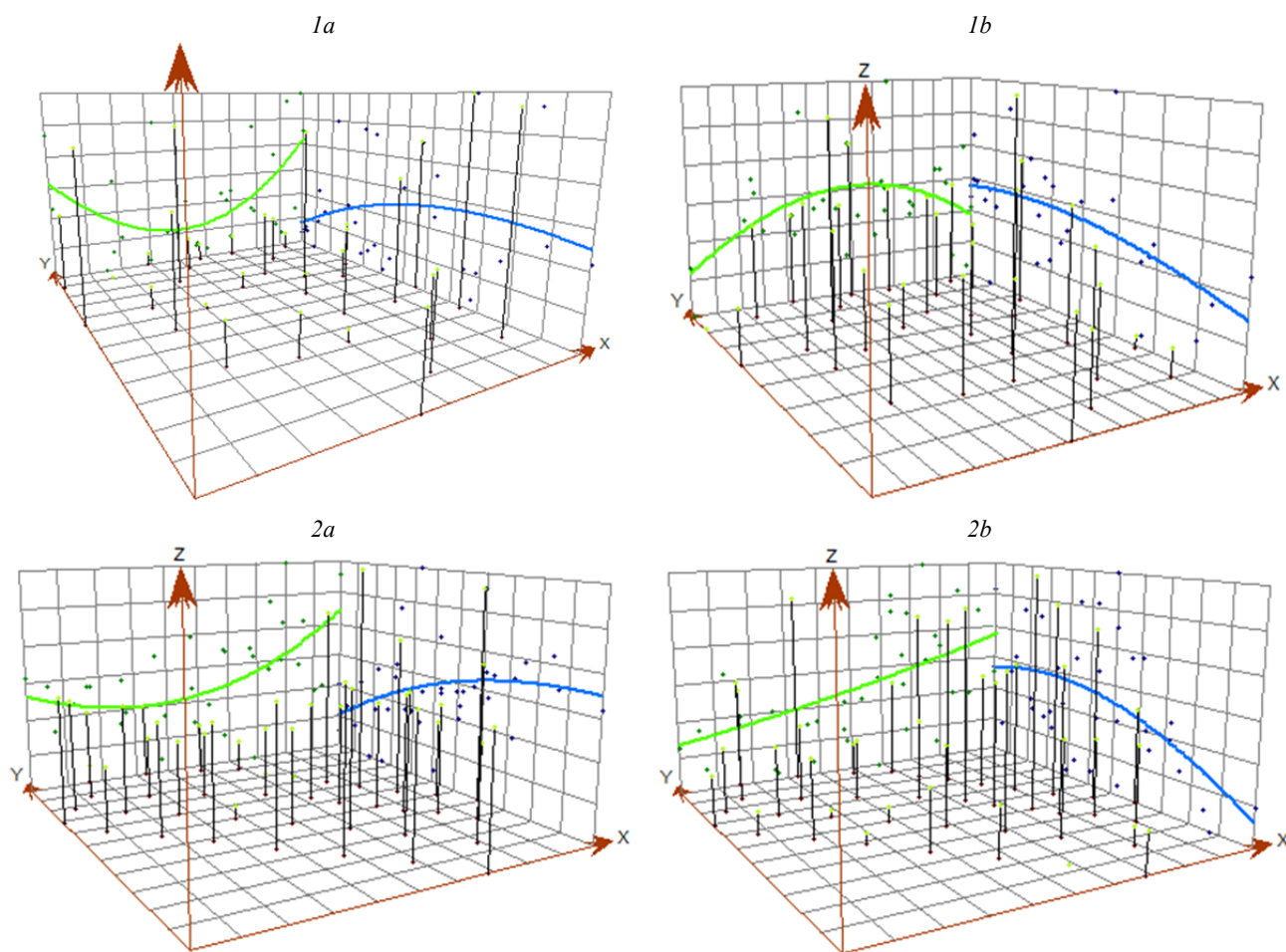


Рис. 1. Анализ тренда при угле 0 градусов: 1а – кислотности на участке № 1; 1б – влажности на участке № 1; 2а – кислотности на участке № 2; 2б – влажности на участке № 2

Fig. 1. Analysis of the trend at an angle of 0 degrees: 1a – acidity at site № 1; 1b – humidity at site № 1; 2a – acidity at site № 2; 2b – humidity at site № 2

Параметры моделей вариограмм лесного участка

Таблица 2

Parameters of the semivariogram models of the forest area

Table 2

Участок	Показатель	Лег, м	Наггет, C_0	Порог, $C_0 + C$	Ранг, м	Остаточная дисперсия $C_0/(C_0 + C)$, %
Лес	Кислотность	15	0,17	0,63	68	26,9
	Влажность		0,36	0,74	109	48,6
Поле	Кислотность	10	0,07	0,14	106	50,0
	Влажность		0,00	0,05	120	0

Кроме вариограммы и ее параметров (табл. 2), на рисунке представлена «карта вариограммы», где синие цвета показывают более низкие значения полу-дисперсии, а красные – высокие. При помощи этого облака можно определить, остались ли незамеченные тренды – если в каком-либо направлении наблюдается скопление завышенных или заниженных значений, то можно предполагать, что остался тренд, влияющий на пространственное распределение данных.

Численно это может показать анизотропия, равная нулю у значений кислотности в правой части вариограммы на участке № 1, что говорит о равномерности распределения данных во всех направлениях. Дисперсия у значений влажности имеет неравномерное распределение – по направлению с северо-востока на юго-запад значение дисперсии значительно меньше, что говорит о еще одном тренде. Для включения этого тренда в картограмму используется направление анизотропии в 45° . На опытном участке

№ 2, как и было определено при анализе тренда, анизотропия присутствует, что подтверждается облаком вариограммы; направление анизотропии у кислотности и влажности составляет 142 и 49° соответственно, что соответствует установленным ранее направлениям.

Полученные значения самородка, порога, ранга и лага количественно характеризуют пространственную

автокорреляцию данных. Значение самородка численно показывает микрокомпоненту и дисперсию при шаге, равном 0 м, и в идеальных условиях он должен равняться 0, что довольно редко встречается в природе, однако в нашем случае на участке № 2 значения самородка у влажности равняются 0. Значения самородка на участке № 1 равняются 0,17 и 0,36 соответственно, а на участке № 2 у кислотности 0,07.

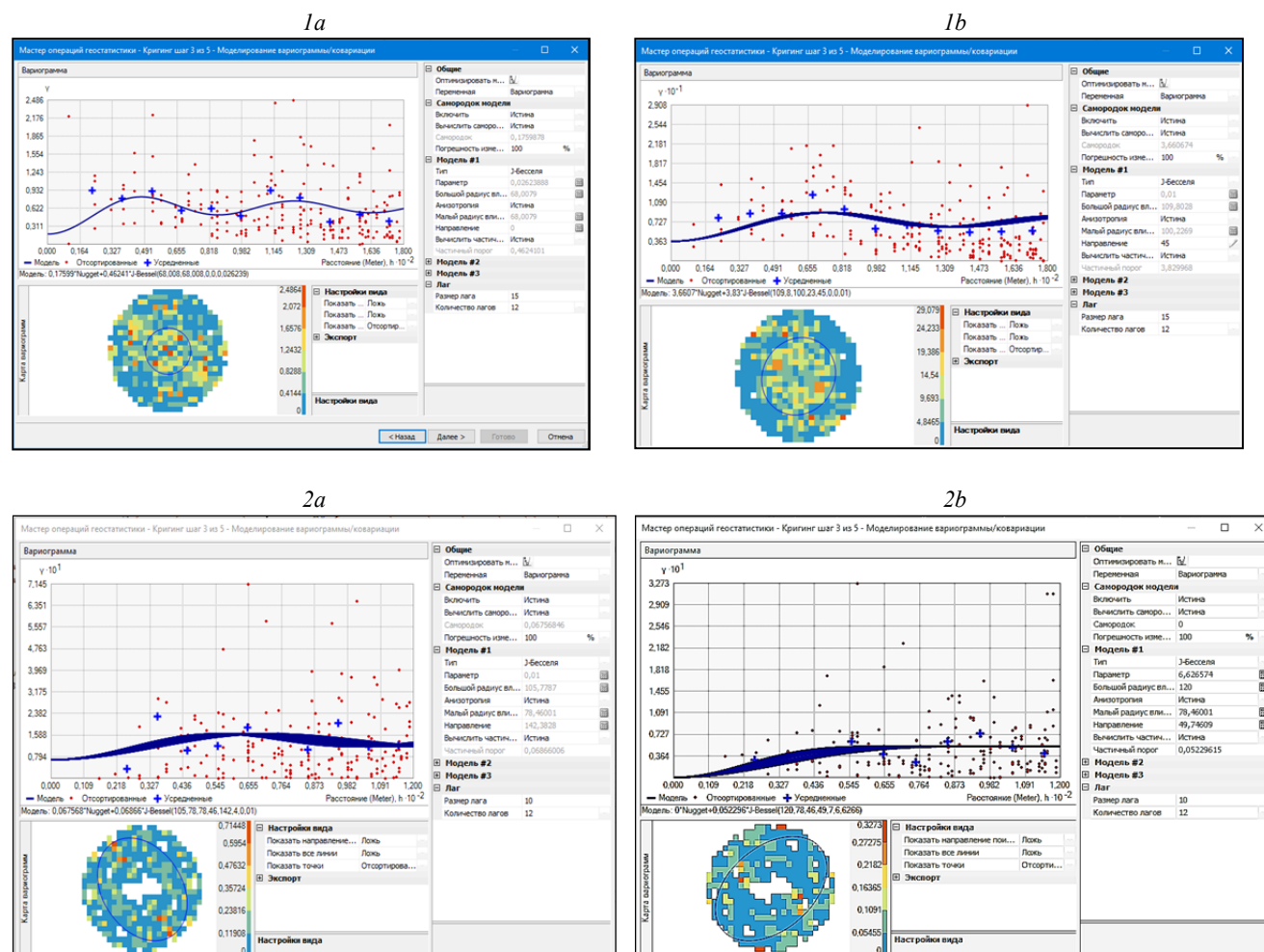


Рис. 2. Вариограммы значений: 1а – кислотности на участке № 1; 1б – влажности на участке № 1; 2а – кислотности на участке № 2; 2б – влажности на участке № 2

Fig. 2. Variograms of values: 1а – acidity at site № 1; 1б – humidity at site № 1; 2а – acidity at site № 2; 2б – humidity at site № 2

На рис. 2 рангу соответствует большой радиус влияния, равняющийся 68 и 109 м у исследуемых свойств на лесном участке и 106 и 120 м на полевом участке, что говорит о том, что на большем расстоянии точки прекращают коррелировать между собой. Таким образом, можно говорить, что диапазон варьирования значений на участке № 2 больше, особенно по кислотности, что связано с нивелированием природной гетерогенности, которая присутствует на лесном участке вследствие хозяйственной деятельности человека.

Порог рассчитывается как сумма самородка и частичного порога и является «высотой» вариограммы, отражающей «силу» вариации. Величина лага – среднего расстояния между точками – была получена с помощью инструмента ArcGIS ArcMap «среднее ближайшее соседство» и составила 15 и 10 м соответственно.

Для трактовки этих параметров в терминах географии почв используется эмпирический критерий, предложенный К.А. Камбарделлой с соавт.: если процентное отношение наггета к порогу составляет

менее 25 %, то пространственная корреляция оценивается как высокая, от 25 до 75 % – как средняя, более 75 % – как низкая [Якушев и др., 2010]. Этот показатель показывает, какова доля случайной микрокомпоненты в суммарной дисперсии пространственной неоднородности участка.

Микрокомпонента значительно влияет на точность картографирования почвенных свойств – при ее высоких значениях точность картограмм будет значительно снижена, при значениях более 75 % картирование нецелесообразно, будет иметь существенные ошибки.

В нашем случае на участке № 1 это значение составляет 26,9 и 48,6 %, что говорит о средней пространственной корреляции между точками пробобора. Более высокое значение ранга и пространственной корреляции у значений влажности по сравнению с кислотностью говорит о большей площади пространственной зависимости между данными, но о меньшей силе взаимосвязи внутри нее.

На участке № 2 значение пространственной корреляции у анализируемых свойств имеет более значительные отличия: остаточная дисперсия по кислотности равняется 50 % – средняя степень пространственной корреляции, а по влажности равняется 0, как и значения самородка, что свидетельствует

ся о сильной пространственной зависимости между точками.

Таким образом, в ходе геостатистического анализа данных о пространственном распределении значений кислотности и влажности на исследуемых участках было определено, что данные показатели могут успешно картироваться при помощи кригинга и полученные картограммы будут максимально соответствовать действительности (рис. 3–6).

Визуальное представление о распределении кислотности на исследуемом участке № 1 дает приведенная ниже картограмма (см. рис. 3).

Для наглядного обоснования необходимости использования геостатистического подхода и отказа от «необдуманного» нажатия кнопок, кроме полученной картограммы, представлены еще два варианта автоматического ординарного кригинга.

В первом случае картограмма построена с помощью инструментов Geostatistical Analyst, но без каких-либо изменений в стандартных настройках, и, как следствие, мы получаем сильно усредненные значения и картограмму с преимущественно одной группой кислотности (слабокислые pH 5,5–6,0) и небольшим фрагментом почв, близких к нейтральным (pH 6,0–6,5), что абсолютно не соответствует реальности.

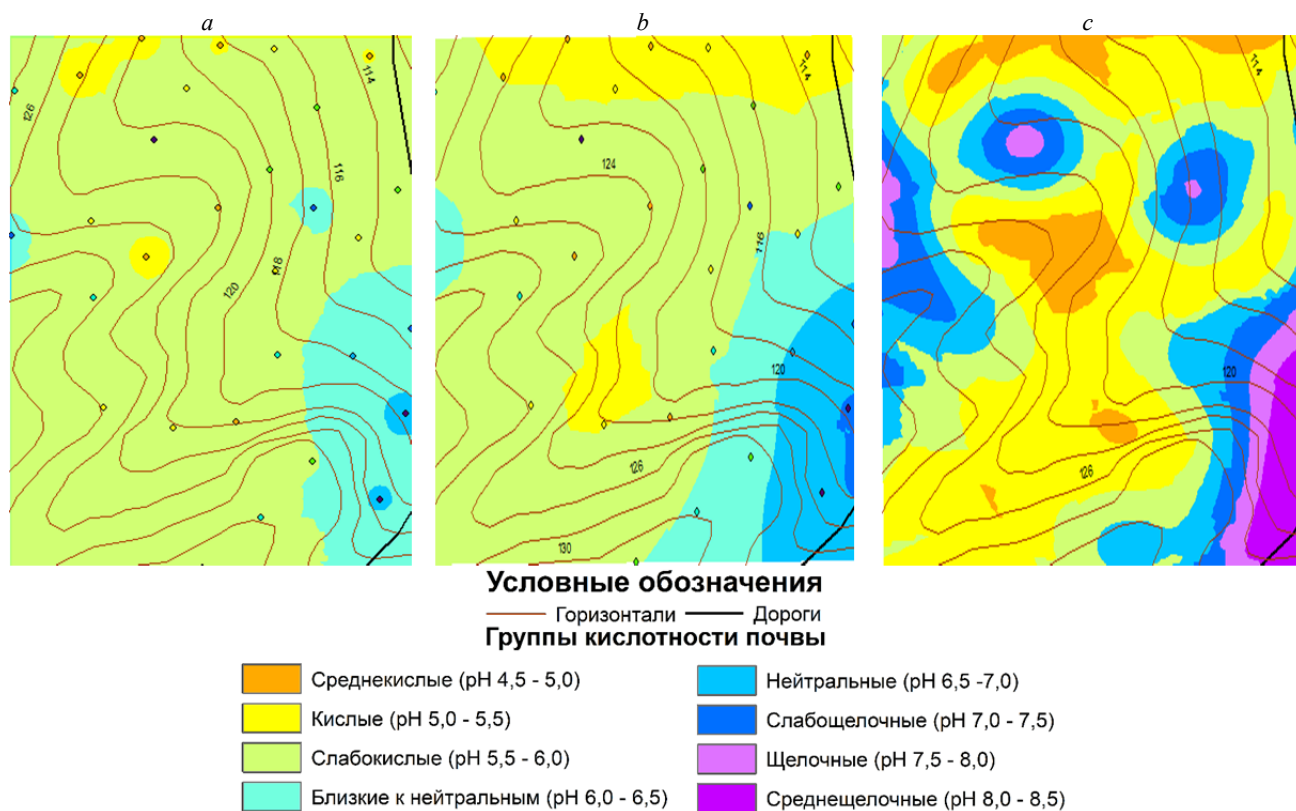


Рис. 3. Картограммы кислотности почвы лесного участка (№ 1), построенные:

a – автоматическим кригингом (Geostatistical Analyst); b – автоматическим кригингом (Spatial Analyst); c – кригингом, при соблюдении геостатистической методики с использованием модели J-Бесселя

Fig. 3. Cartograms of soil acidity of the forest area (№ 1) constructed by:

a – automatic kriging (Geostatistical Analyst); b – automatic kriging (Spatial Analyst);

c – kriging, subject to the geostatistical methodology using the J-Bessel model

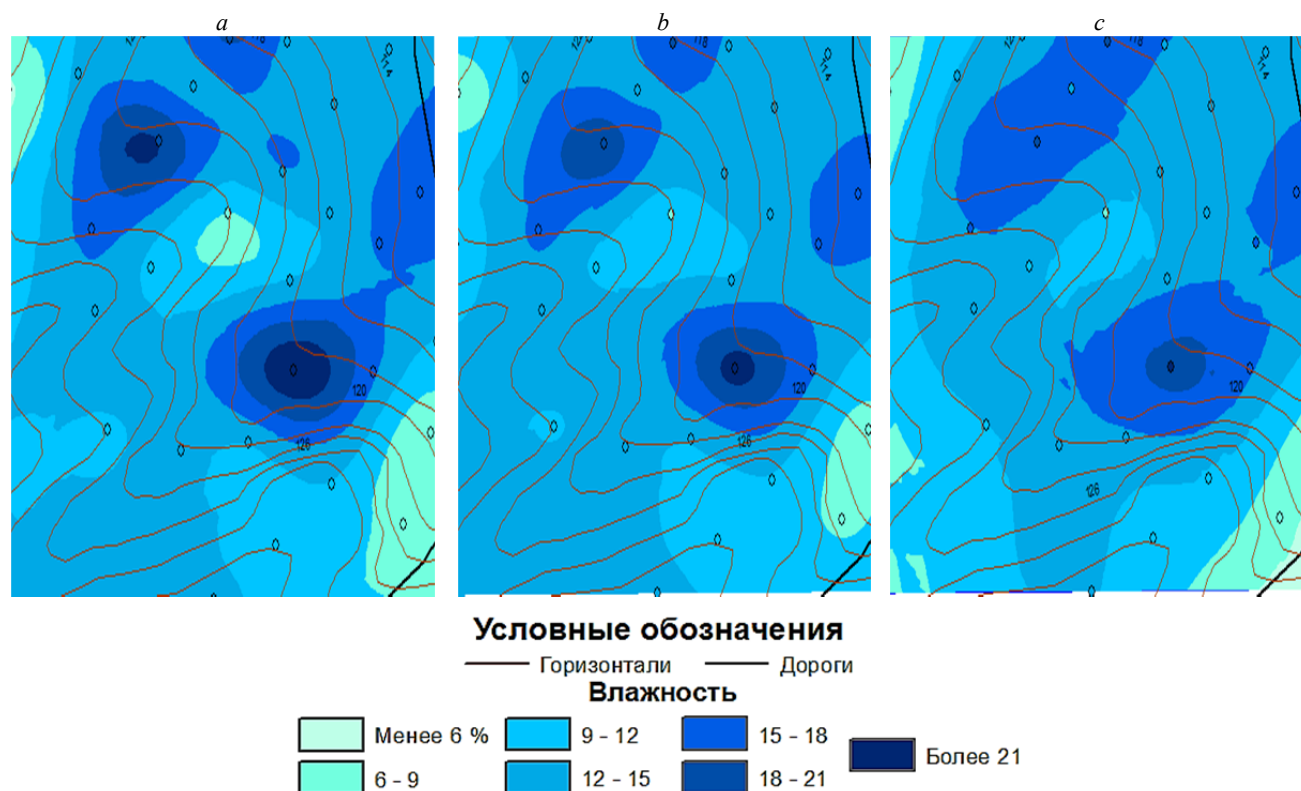


Рис. 4. Картограммы влажности почвы лесного участка (№ 1), построенные:
а – автоматическим кригингом (Geostatistical Analyst); **б** – автоматическим кригингом (Spatial Analyst);
с – кригингом, при соблюдении геостатистической методики с использованием модели J-Бесселя

Fig. 4. Cartograms of soil moisture in the forest area (№ 1) constructed by:
a – automatic kriging (Geostatistical Analyst); **b** – automatic kriging (Spatial Analyst);
c – kriging, subject to the geostatistical methodology using the J-Bessel model

Вторая картограмма, построенная с помощью модуля Spatial Analyst, увеличивает дифференциацию территории по группам кислотности – появилась значительная область кислых почв (pH 5,0–5,5) на севере и отдельный массив в центре участка; на юго-востоке – нейтральные почвы (pH 6,5–7,0) с небольшими вкраплениями слабощелочных (pH 7,0–7,5), однако данная картограмма также далека от действительности.

Максимально приближенное к реальности распределение кислотности отражает третья картограмма (с), построенная с соблюдением всех правил геостатистического анализа. На ней мы можем наблюдать, что на участке представлены восемь групп кислотности почвы, от среднекислых (pH 4,5–5,0) на севере и центральной части участка до щелочных в западной части участка (pH 7,5–8,0) и среднешелочных (pH 8,0–8,5) на юго-востоке исследуемой территории, а большая часть центральной части представлена кислыми (pH 5,0–5,5) почвами.

Данное географическое распределение показателей кислотности носит неслучайный характер. В первую очередь наличие большого массива кислых и наличие среднекислых почв является типичным для

данного участка, так как на участке преобладает зональный подзолистый процесс, который подкисляет почву. Щелочные почвы приурочены к ложбинам стока, и реакция их среды гипотетически обусловлена карбонатной мореной, выходящей к поверхности в местах смыва верхних горизонтов почв.

Пространственное распределение влажности представлено на рис. 4.

Как и для значений кислотности, кроме основной картограммы (с), были построены две другие с помощью автоматических вариантов ординарного кригинга. Полученные картограммы, в отличие от картограмм кислотности, не имеют столь разительных отличий друг от друга, но, тем не менее, эти различия есть.

Так, у первых двух картограмм в первую очередь отсутствуют отображения выявленных трендов, и большая часть территории представляется почвой с влажностью 12–15 %, игнорируя повышение территории с востока на запад. Также важным отличием является выделение ареала вокруг точки пробоотбора со значением влажности более 21 %. Это связано в первую очередь с тем, что автоматические кригинги не учитывают статистическую обработку, а поскольку

значение эксцесса незначительно превышает свое предельное значение, то распределение является только приближенным к нормальному и должно быть учтено при построении картограмм, что и сделано на картограмме (рис. 4, с), где учитываются имеющиеся тренды (ареалы вытянуты с юго-запада на северо-восток) и гипсометрические различия – территории с повышенной влажностью приурочены к ложбинам стока, а более сухие места – к повышениям.

Распределение кислотности на участке № 2 в большей степени обуславливается внесением доломитовой муки, которая является основным мелиорантом в Республике Беларусь, нежели природными процессами (рис. 5). Как и для участка № 1, были построены картограммы различными способами. Отсутствие сильной дифференциации значение pH в KCl и нормальное распределение данных упрощают работу инструментов интерполяции, делая картограммы не столь отличимыми друг от друга. Но стоит отметить значительное упрощение рисунка при использовании автоматического кригинга инструментом Spatial Analyst, который выделяет три преобладающие группы кислотности, игнорируя точки пробоотбора с кислой реакцией (pH 5,0–5,5) и слабощелочные (pH 7,0–7,5).

Картограмма, полученная инструментом Geostatistical Analyst автоматическим кригингом, не имеет существенных отличий от итоговой картограммы, построенной при соблюдении геостатистической методики с использованием модели J-Бесселя. Основными отличиями можно считать включение имеющего тренда, увеличение площади слабощелочных почв (pH 7,0–7,5) в западной самой низкой части участка, а также, в связи с включением анизотропии при построении вариограммы, интерполяция значений проводится непосредственно на территории, где отбирались образцы, лишь незначительно выступая за границы участка обозначенной точками пробоотбора.

Основной закономерностью в распределении кислотности на участке № 2 можно считать повышение кислотности с юго-востока на северо-запад. Данное направление совпадает с направлением обработки данного поля, на основании чего можно сделать вывод, что участки, приближенные к дороге (началу поля), получают больше мелиоранта, нежели более удаленные территории данного участка.

В пространственном распределении содержания влаги в почве определяющим фактором является рельеф территории – влага скапливается в понижениях, и, как следствие, на более высоких участках местности содержание влаги будет меньше. Данный тезис подтверждается и полученными картограммами (рис. 6). Соответствие ареалов разной степени увлажнения с гипсометрическим уровням территории может быть хорошим индикатором точности картограмм.

Таким образом, можно видеть, что картограмма № 3 на рис. 6 наиболее точно отражает дифференциацию значений влажности. Наибольшее увлажнение испытывают почвы в понижениях территории, представленные ложбинами стока в северо-восточной части участка, где содержание влаги достигает 24 % и более. В свою очередь, на юге и юго-западе, где гипсометрический уровень наиболее высок, содержание влаги не превышает 9 %.

Сравнивая полученные картограммы содержания влаги в почве лесного (№ 1) и полевого (№ 2) участка, можно заметить, что в целом участок № 2 более влажный, чем лесной. Так, в лесу содержание влаги не превышает 22,4 %, не опускается ниже 6,0 % и в среднем колеблется в диапазоне 12–15 %, что мы объясняем стабилизирующим действием многолетней растительности. На поле можно наблюдать более пестрый рисунок распределения влажности, большая часть территории занята почвами с влажностью более 15 % с максимальным значением в 26,4 %, содержание влаги не опускается ниже 7,2 %.

Заключение

Применение геостатистического подхода является неотъемлемой частью цифрового почвенного картографирования, а именно процесса построения картограмм почвенных свойств и анализа их пространственного распределения. В ходе нашего исследования была продемонстрирована важность первичной статистической обработки полученных результатов.

При нормальном распределении и отсутствии сильной вариабельности значений картограммы, полученные с помощью автоматических инструментов интерполяции, могут, в целом, адекватно отражать реальную картину распределения кислотности и влажности, однако все же уступают картограммам, построенным при соблюдении описанной методики. При отсутствии нормального распределения данных (что встречается значительно чаще), автоматический кригинг теряет свое преимущество наилучшего линейного несмещенного оценителя, которое выражается в минимальной дисперсии прогноза, и картограммы в таком случае существенно упрощают реальную картину распределения тех или иных свойств.

Анализ показателей вариограмм показал более сильную пространственную зависимость значений кислотности на участке № 1. В свою очередь, содержание влаги в почве имеет значительную взаимосвязь между собой на участке № 2. Доля микрокомпоненты во всех случаях не превышала 50 %, что позволило успешно картировать исследуемые почвенные свойства. Также это позволяет говорить, что большая часть (мезокомпонента) общей неоднородности исследуемых участков может быть исследована и описана в терминах географии почв.

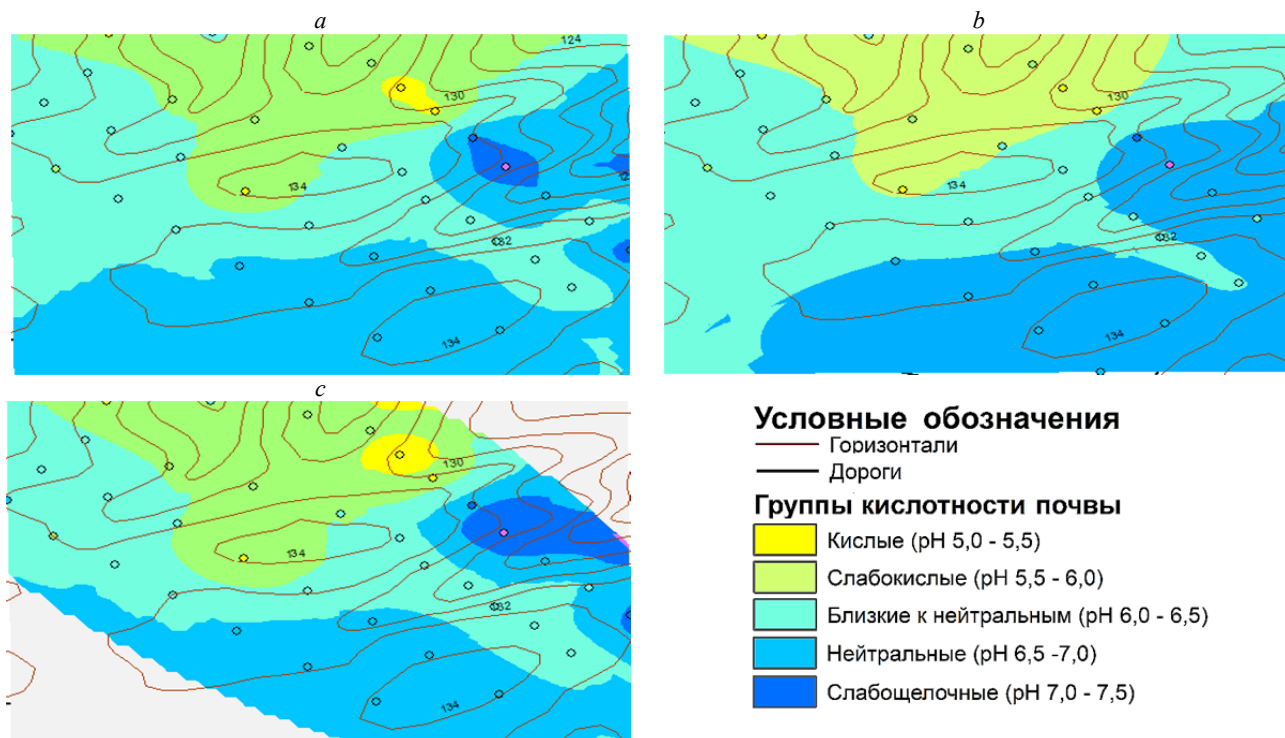


Рис. 5. Картограммы кислотности почвы полевого участка (№ 2), построенные:
а – автоматическим кригингом (Geostatistical Analyst); б – автоматическим кригингом (Spatial Analyst);
с – кригингом, при соблюдении геостатистической методики с использованием модели J-Бесселя

Fig. 5. Cartograms of soil acidity of the field site (№ 2) constructed by:
а – automatic kriging (Geostatistical Analyst); б – automatic kriging (Spatial Analyst);
с – kriging, subject to the geostatistical methodology using the J-Bessel model

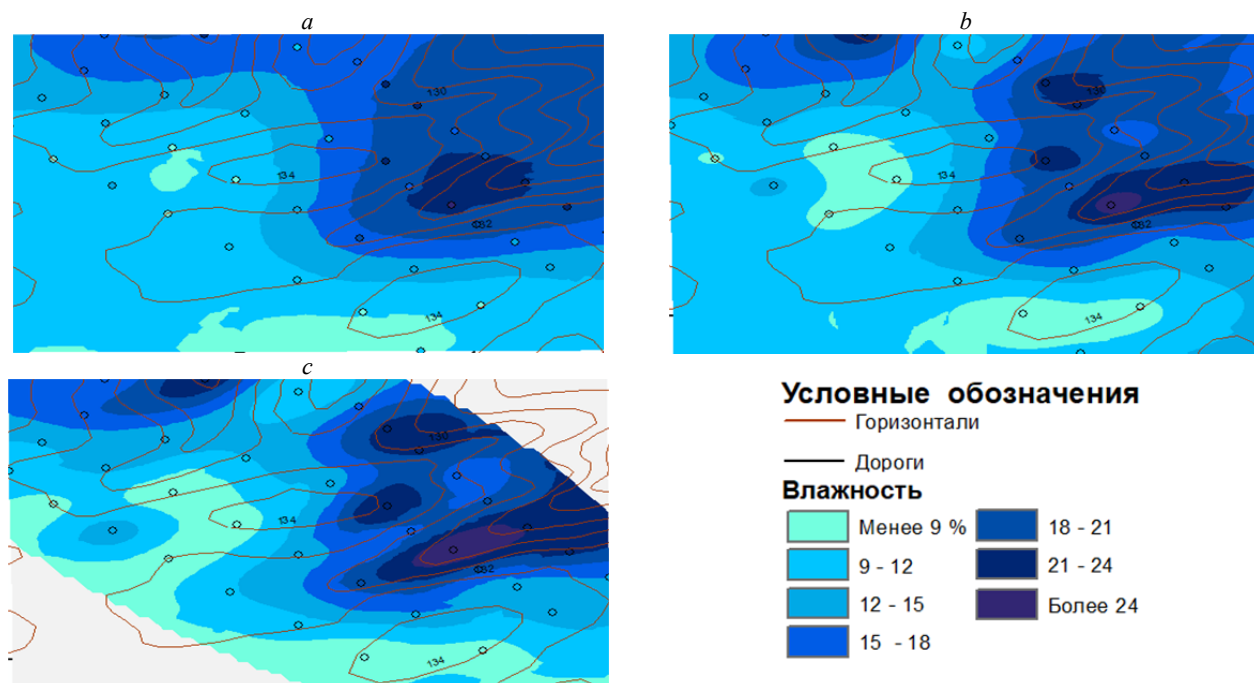


Рис. 6. Картограммы влажности почвы полевого участка (№ 2), построенные:
а – автоматическим кригингом (Geostatistical Analyst); б – автоматическим кригингом (Spatial Analyst);
с – кригингом, при соблюдении геостатистической методики с использованием модели J-Бесселя

Fig. 6. Cartograms of soil moisture of the field site (№ 2) constructed by:
а – automatic kriging (Geostatistical Analyst); б – automatic kriging (Spatial Analyst);
с – kriging, subject to the geostatistical methodology using the J-Bessel model

При сильной пространственной автокорреляции значения ранга меньше, чем при среднем или низком уровне пространственной зависимости, что говорит о большей площади пространственной зависимости между данными, но о меньшей силе взаимосвязи внутри ее.

При анализе анизотропии были выявлены основные тренды варьирования исследуемых показателей, в направлении которых господствующую роль играет рельеф территории, особенно для влажности.

Также на основании трендов и полученных картограмм было установлено существенное влияние антропогенного воздействия на процессы пространственного распределения кислотности, которое выражается практически в полном отсутствии влияния перепада высот на значения pH в KCl и определяется характером работы по внесению средств химизации. Также был подтвержден факт увеличения содержания влаги на обрабатываемых почвах, не покрытых постоянно растительностью.

ЛИТЕРАТУРА

- Байков В., Бакиров Н., Яковлев А.** Математическая геология : учеб. пособие. Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2012. Т. 1, № 4. 227 с.
- Демьянов В.В., Савельева Е.А.** Геостатистика: теория и практика. М. : Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2010. 327 с.
- Киндеев А.Л.** Геостатистическая характеристика изменчивости свойств почвы // Сборник работ 74-й науч. конф. студентов и аспирантов Белорусского государственного университета. Минск, 2017. Т. 1. С. 314–318.
- Клебанович Н.В., Киндеев А.Л.** Геостатистический анализ пространственной неоднородности кислотности почв // Природные ресурсы. 2018. № 1. С. 138–147.
- Матерон Ж.** Основы прикладной геостатистики. М., 1952. 460 с.
- Сорокина Н.П., Козлов Д.Н.** Возможности цифрового картографирования структуры почвенного покрова // Почвоведение. 2009. № 2. С. 198–210.
- Фридланд В.М.** Структура почвенного покрова. М. : Мысль, 1972. 336 с.
- Якушев В.П., Жуковский Е.Е., Кабанец А.Л., Петрушин А.Ф., Якушев В.В.** Вариограммный анализ пространственной неоднородности сельскохозяйственных полей для целей точного земледелия. СПб. : АФИ. 2010. 48 с.
- Lund E.D., Adamchuk V.I., Collings K.L., Drummond P.E., Christy C.D.** Development of soil pH and development of soil pH and lime requirement maps using lime requirement maps using on-the-go soil sensors go soil sensors Uppsala. Univ. of Uppsala, 2007. 9 p.
- Cambardella C.A., Moorman T.B., Jeff N., Parkin T.B., Douglas K., Ronald F.T., Konopka A.E.** Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils // Soil Science Society of America Journal. Sept., 1994. V. 58. P. 1501–1511.
- Olfs H.-W., Borchert A., Trautz D.** Soil pH maps derived from on-the-go pH- basis for variable lime application under German conditions: concept development and evaluation in field trials. Osnabruck : Nutrition University of Applied Sciences Osnabruck Am Kruempel, 2010. 10 p.
- Oliver M.A., Webster R.A.** Geostatistics for Environmental Scientist. John Wiley & Sons, Ltd., 2007. 318 p.
- Oliver M.A., Webster R.A.** Tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging // Catena. 2014. № 113. P. 56–69.

Авторы:

Клебанович Николай Васильевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой почвоведения и геоинформационных систем, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.

E-mail: n_klebanovich@inbox.ru

Киндеев Аркадий Леонидович, преподаватель, кафедра почвоведения и геоинформационных систем, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.

E-mail: AKindeev@tut.by

Сазонов Алексей Александрович, старший преподаватель, кафедра почвоведения и геоинформационных систем, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.

E-mail: alexey.szonov@gmail.com

Geosphere Research, 2021, 3, 80–91. DOI: 10.17223/25421379/20/6

N.V. Klebanovich, A.L. Kindeev, A.A. Sazonov

Belarusian State University, Republic of Belarus, Minsk

GEOSTATISTICAL ANALYSIS IN MAPPING THE SPATIAL HETEROGENEITY OF SOIL HUMIDITY AND ACIDITY

The relevance of the study of geostatistical methods and their application in practice in soil-geographical surveys takes place both from an economic and scientific point of view. Without detailed accounting of soil heterogeneity, which can be provided by geostatistics, farms lose a large amount of material and financial resources. The purpose of the study presented in the article is to study the spatial variability of soil acidity and moisture content in experimental plots using geostatistical research methods, substantiate their use in constructing cartograms of the studied properties, and determine the degree of influence of the anthropogenic factor on the heterogeneity of the studied properties. The object of the study was two experimental sites, laid on the territory of the Volozhin district of the Minsk re-

gion, in the area of the educational and geographical station "Western Berezina". They are represented by a forest area of 3.8 hectares. On these plots, 30 samples were taken and a plot of arable land adjacent to the forest with an area of 5.9 hectares, on which 37 samples were taken. The importance of primary statistical processing of information is shown, and the main stages of the geostatistical approach as a whole are reflected. When analyzing the anisotropy, it was possible to identify the presence of trends characterized by a second order polynomial, and to determine its direction for the studied soil properties in the studied areas. With the help of variogram analysis, an idea of the degree of variation of the studied properties at different hierarchical levels of the general heterogeneity of the areas was obtained, and a quantitative assessment of the accuracy of cartograms was obtained. In the course of geostatistical analysis, based on the residual variance values, it was determined that the studied indicators on the experimental plots can be successfully mapped using kriging and the resulting cartograms will be as close to reality as possible. A comparative characteristic of the final cartograms constructed by different interpolation methods is given, which substantiated the use of the method of geostatistical analysis in cases of high variability of data and the absence of normal distribution in them. When analyzing the anisotropy, the main trends in the variation of the studied parameters were revealed, in the direction of which the relief of the territory plays a dominant role, especially for humidity. A significant influence of anthropogenic impact on the processes of spatial distribution of acidity was established based on trends and obtained cartograms. This is reflected in the almost complete absence of the influence of the height difference on the pH value in KCl and is determined by the nature of the work on the introduction of toxic substances. It has been confirmed that there is an increase in moisture content in cultivated soils that are not permanently covered with vegetation.

Keywords: *geostatistics, heterogeneity of soil properties, variography, humidity, acidity.*

References

- Baikov V., Bakirov N., Yakovlev A. *Matematicheskaya geologiya. Uchebnoye posobiye* [Mathematical Geology. Textbook]. Izhevsk "Institute of Computer Research", 2012 V. 1. No 4. 227 p. In Russian
- Demyanov V.V., Savelieva E.A. *Geostatistika: teoriya i praktika. Institut problem bezopasnogo razvitiya atomnoy energetiki RAN* [Geostatistics: theory and practice]. Institute for the Problems of Safe Development of Nuclear Power Industry. 2010. 327 p. In Russian
- Kindeev A.L. *Geostatisticheskaya izmenchivost' svoystv pochvy // Sbornik rabot 74-y nauch. konf. studentov i aspirantov Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta* [Geostatistical characteristics of the variability of soil properties] // Collection of works of the 74th scientific. conf. students and postgraduates of the Belarusian State University. Minsk. 2017. V. 1. pp. 314–318. In Russian
- Klebanovich N.V., Kindeev A. L. *Geostatisticheskiy analiz prostranstvennoy neodnorodnosti kislotnosti pochv* [Geostatistical analysis of the spatial heterogeneity of soil acidity] // Natural resources. 2018. No 1. pp. 138–147. In Russian
- Materon J. *Osnovy prikladnoy geostatistiki* [Foundations of Applied Geostatistics]. Moscow. 1952. 460 p. In Russian
- Sorokina N.P., Kozlov D.N. *Vozmozhnosti tsifrovogo kartografirovaniya struktury pochvennogo pokrova* [Possibilities of digital mapping of the soil cover structure] // Pochvovedenie, 2009. No 2. pp. 198–210. In Russian
- Friedland V.M. *Struktura pochvennogo pokrova* [The structure of the soil cover]. Moscow, 1972. 336 p. In Russian
- Yakushev V.P., Zhukovsky E.E., Kabanets A.L., Petrushin A.F., Yakushev V.V. *Variogrammnnyy analiz prostranstvennoy neodnorodnosti sel'skokhozyaystvennykh tseley dlya tochnogo zemledeliya* [Variogram analysis of spatial heterogeneity of agricultural fields for the purposes of precision farming]. St. Petersburg. 2010. 48 p. In Russian
- Lund E.D., Adamchuk V.I., Collings K.L., Drummond P.E., Christy C.D. Development of soil pH and development of soil pH and lime requirement maps using lime requirement maps using on-the-go soil sensors go soil sensors Uppsala. Univ. of Uppsala. 2007. 9 p.
- Cambardella C.A., Moorman T.B., Jeff N., Parkin T.B., Douglas K., Ronald F.T., Konopka A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils // Soil Science Society of America Journal. Sept., 1994. V. 58. pp. 1501–1511.
- Olfs H.-W., Borchert A., Trautz D. Soil pH maps derived from on-the-go pH- basis for variable lime application under German conditions: concept development and evaluation in field trials. Osnabruck: Nutrition University of Applied Sciences Osnabruck Am Kruempel, 2010. 10 p.
- Oliver M.A., Webster R.A. *Geostatistics for Environmental Scientist* // John Wiley & Sons, Ltd. 2007. 318 p.
- Oliver M.A., Webster R.A. Tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging // Catena. 2014. No 113. pp. 56–69.

Author's:

Klebanovich Nikolai Vasilievich, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Head of the Department of Soil Science and Geoinformation Systems, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.

E-mail: n_klebanovich@inbox.ru

Kindeev Arkady Leonidovich, Lecturer, Department of Soil Science and Geoinformation Systems, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.

E-mail: AKindeev@tut.by

Sazonov Aleksey Aleksandrovich, Senior Lecturer, Department of Soil Science and Geoinformation Systems, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.

E-mail: alexey.sazonov@gmail.com