

ISSN 0130-8475

Институт почвоведения и агрохимии

ПОЧВОВЕДЕНИЕ И АГРОХИМИЯ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1961 г.

**№ 2(73)
Июль – декабрь 2024 г.**

Минск
2024

УДК 631.4+631.8(476)
ББК 40.4+40.3(Бел)

Учредитель: Республиканское научное дочернее унитарное предприятие
«Институт почвоведения и агрохимии»

Свидетельство № 721 от 6 октября 2009 г.
Министерства информации Республики Беларусь

Главный редактор *Ю. К. ШАШКО*

Редакционная коллегия: В. В. ЛАПА (зам. главного редактора)
Т. М. СЕРАЯ (зам. главного редактора)
Н. Ю. ЖАБРОВСКАЯ (ответственный секретарь)

Т. Н. АЗАРЕНОК, И. Г. АСЫЛБАЕВ, И. М. БОГДЕВИЧ, И. Р. ВИЛЬДФЛУШ,
Д. Р. ИСЛАМГУЛОВ, С. А. КАСЬЯНЧИК, Е. Г. МЕЗЕНЦЕВА,
Н. А. МИХАЙЛОВСКАЯ, Г. В. ПИРОГОВСКАЯ,
Ю. В. ПУТЯТИН, М. В. РАК, В. Г. СЫЧЕВ, В. Б. ЦЫРИБКО

ПОЧВОВЕДЕНИЕ И АГРОХИМИЯ

2(73)

Июль – декабрь 2024 г.

Основан в 1961 г. как сборник научных трудов «Почвоведение и агрохимия»,
с 2004 г. преобразован в периодическое издание – научный журнал
«Почвоведение и агрохимия»

Адрес редакции: 220108, г. Минск, ул. Казинца, 90
Тел. (017) 351-08-21, факс (017) 374-04-02
E-mail: brissainform@mail.ru

Ответственная за выпуск *Н. Ю. Жабровская*

Редакторы *Т. Н. Самосюк, А. С. Атлас*
Компьютерная верстка *А. С. Атлас*

Подписано в печать 22.12.2024. Формат 70х100 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 11,28. Уч.-изд. л. 10,87. Тираж 50 экз. Заказ 658.

Республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр
Министерства финансов Республики Беларусь»
ЛП № 02330/89 от 3.03.2014. Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск.

© Республиканское научное дочернее унитарное
предприятие «Институт почвоведения и агрохимии», 2024

ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОСТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПРИ УЧЕТЕ ВНУТРИПОЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЧВЕННОЙ КИСЛОТНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИЗВЕСТКОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

М. В. Воробей, А. Л. Киндеев

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

В Беларуси при проведении агрохимических обследований сельскохозяйственных земель с одного элементарного участка обычно берут 20–35 проб, суммарная масса которых составляет 0,6 кг, на их основе формируется смешанный образец [1]. Этот подход широко применялся во второй половине XX века, когда в стране проводились масштабные почвенные и агрохимические исследования. В результате таких работ было установлено, что 83,0 % пахотных земель требуют известкования. В течение последующих 40 лет в почвы Беларуси было внесено около 150 млн т CaCO_3 , что в среднем составило 15–20 т/га. К концу 2010-х годов лишь 5,2 % пахотных земель имели уровень pH ниже 5,0 [2]. Однако в дальнейшем государственное финансирование на мероприятия по химической мелиорации сократилось, и за последние 10–15 лет достигнутый результат стал постепенно снижаться. В настоящее время вновь возникает необходимость проведения таких работ, но с применением современных технологий, включающих методы точного земледелия, дистанционного зондирования и геоинформационных систем.

С 2014 по 2023 гг. площадь сельскохозяйственных земель в Беларуси сократилась с 8726,4 тыс. га до 8036,3 тыс. га [3, 4], что отражает значительные изменения в землепользовании, вызванные процессами урбанизации, индустриализации и природоохранными мерами. В этих условиях обеспечение продовольственной безопасности требует повышения эффективности использования оставшихся сельскохозяйственных угодий. Одним из ключевых направлений для этого является увеличение урожайности, что можно достичь за счёт рационального управления земельными ресурсами. Внедрение методов геостатистики, позволяющих моделировать и анализировать пространственную неоднородность почвенных свойств, может существенно помочь в этом процессе. Такие методы дают возможность более точно определить участки с различными потребностями в удобрениях и корректировке кислотности, что способствует оптимизации агротехнологических мероприятий и повышению продуктивности сельского хозяйства.

Кислотность почвы является одним из ключевых показателей ее плодородия, оказывая значительное влияние на состояние почвенной среды, рост и развитие сельскохозяйственных культур. Она играет важную роль в определении доступности питательных веществ для растений, так как уровень кислотности напрямую влияет на усвояемость различных микро- и макроэлементов. При слишком высоких или низких значениях pH некоторые элементы, такие как фосфор, кальций и магний, могут стать менее доступными для корневой системы растений, что снижает эффективность использования удобрений [5]. Таким образом, правильное управление кислотностью почвы является важным фактором для повышения продуктивности сельского хозяйства.

Одним из современных подходов к анализу пространственного распределения агрохимических свойств, в том числе и почвенной кислотности, на локальном уровне является использование методов геостатистики, как одной из технологий точного земледелия. Геостатистика представляет собой аналитический инструмент, основанный на теории вероятностей, который позволяет моделировать пространственные и временные процессы, описывая их с помощью математико-статистических показателей. Такой подход дает возможность выявлять закономерности распределения данных и проводить их классификацию, что способствует наиболее точному прогнозированию и интерпретации результатов.

Интерполяционные поверхности, полученные при применении методов геостатистики представляют собой наименьшую несмещенную погрешность [6], т. е. прогноз имеет минимальные ошибки. Использование таких картограмм вместе с точным позиционированием сельскохозяйственной техники позволяет вносить средства химизации с минимальными расходами на проведения химической мелиорации, в том числе и известкования. При этом работ в данной области в Республике Беларусь проводится недостаточно для того, чтобы говорить о повсеместном переходе на такие системы земледелия. Исходя из чего, целью данного исследования является анализ целесообразности применения геостатистического подхода при учете внутрипольной неоднородности почвенной кислотности при проведении известкования.

Преобладающее количество исследований в области применения геостатистических методов для моделирования свойств почвенного покрова проводится за рубежом – в Европе, Америке, Азии и Австралии. В то же время в России и Беларуси использование этих методов остается ограниченным, что затрудняет переход на системы точного земледелия. Тем не менее, любые работы в этом направлении, проводимые в отечественном почвоведении, имеют существенный научный и практический потенциал, способствуя развитию аграрного сектора.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являются почвы рабочего участка, находящегося вблизи деревни Милевцы, ОАО «Кошелево-Агро» Новогрудского района Гродненской области. Предметом исследования является внутрипольная неоднородность почвенной кислотности. Почвы не однородны по типу и генезису почвообразующих пород: дерново-подзолистые и дерново-подзолистые заболоченные, большая часть рабочего участка моренного происхождения, однако северо-западная часть имеет лессовидное подстиление, также присутствуют мелко-контурные ареалы дерново-карбонатных почв. По гранулометрическому составу, на большей части территории, преобладают связно-супесчаные почвы, среднее содержание гумуса – 1,5 %. Участок расположен на склоне и имеет сложный рельеф, перепад высот составляет 38 м, общая площадь – 180,7 га.

В целях изучения целесообразности учета внутрипольной неоднородности кислотности использовались картограмма кислотности почв и почвенная карта М 1 : 10 000, полученные по запросу в ОАО «Кошелево-Агро». Также в ходе работы с помощью таблицы 1 были рассчитаны возможные затраты на проведение известкования по установленному в Республике Беларусь агрохимическому обследованию сельскохозяйственных земель и геостатистическому методу.

Таблица 1

Дозы известковых мелиорантов (т/га CaCO_3) для известкования кислых почв пахотных земель (фрагмент) [7]

Группы почв	Содержание гумуса, %	рН солевой вытяжки					
		≤ 4,25	4,26–4,50	4,51–4,75	4,76–5,00	5,01–5,25	5,26–5,50
Песчаные	≤ 1,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5
	1,51–3,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
	>3,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5
Рыхло-супесчаные	≤ 1,5	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
	1,51–3,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5
	> 3,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0
Связно-супесчаные	≤ 2,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0
	> 2	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	4,5

Для картографирования кислотности почвы с использованием геоestatистических методов необходимо следующее: произвести отбор проб и лабораторный анализ; проанализировать пространственное распределение полученных данных с помощью показателей описательной статистики и произвести подбор математической модели вариограммы к эмпирическим данным для оценки пространственной зависимости между значениями кислотности почвы; провести кросс-валидацию полученных результатов и составить картографический материал на основе получившихся моделей вариограмм и их ошибок.

Отбор образцов проводился в середине сентября, после уборки урожая озимой тритикале. Образцы отбирались лопатой на глубине 0–20 см по заранее созданной сетке точек с шагом 70 м (рис.1).

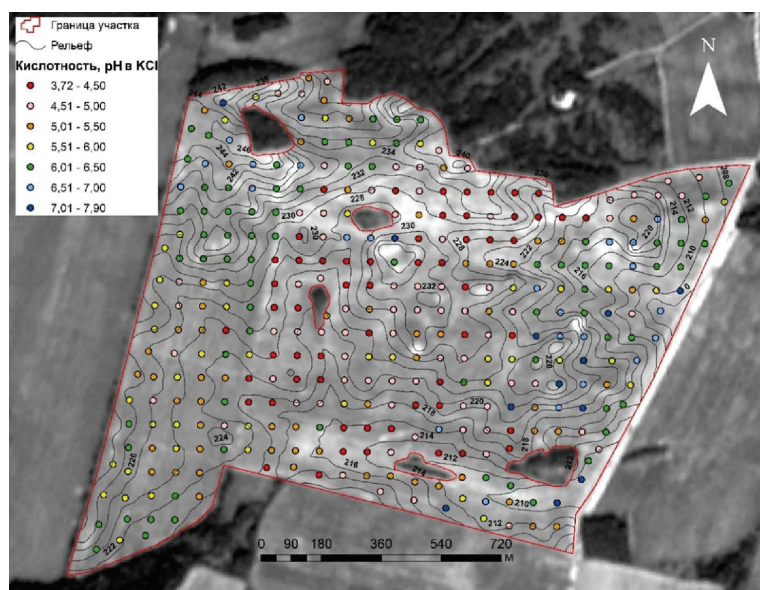


Рис.1. Места отбора почвенных образцов и распределение pH

Всего было отобрано 343 образца, их можно прировнять к 343 уколам бура, что соответствует плотности пробоотбора около 2 образцов на 1 га. Для данного исследования определение pH солевой вытяжки проводилось по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483) с использованием pH-метра-милливольтметра pH-150M. Экспериментальные данные были занесены в таблицы Excel, где был проведен статистический анализ их распределения. Все процедуры по построению вариограмм и интерполяции выполнялись в программном обеспечении компании ESRI ArcGIS Pro в модуле «Geostatistical Analyst», также для облегчения последующих расчетов эффективности внесения мелиоранта по классическому агрохимическому обследованию сельскохозяйственных земель был использован модуль «выявления изменений».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам статистической обработки данных была построена гистограмма распределения данных и получены показатели описательной статистики, на основании которых можно констатировать отклонение от нормального распределения ряда данных (рис. 2, табл. 2).

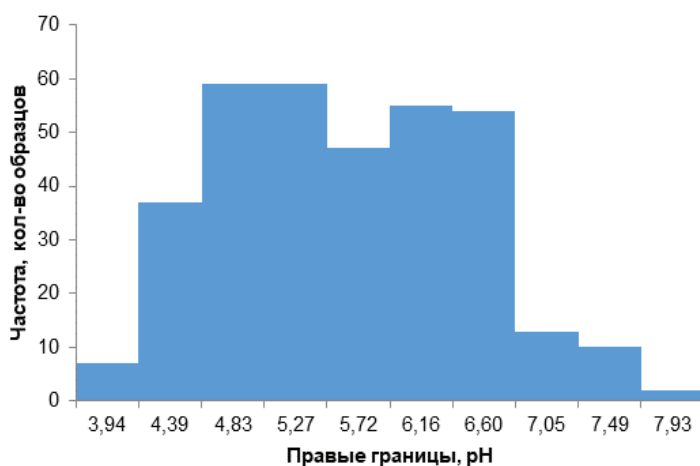


Рис.2. Гистограмма распределения почвенной кислотности

По гистограмме можно определить сконцентрированное «ядро» данных в диапазонах от 4,84 до 6,60 pH_{KCl} , что предварительно указывает на отклонение по эксцессу, а отсутствие островершинных пиков в данным, говорит об отрицательном значении данного показателя. Не столько очевидно отклонение ряда данных по коэффициенту асимметрии – предварительно можно констатировать незначительное преобладание щелочных почв (pH более 7,0) в ряде данных над очень сильно кислыми (pH менее 4,0).

Для доказательств выявленных особенностей распределения значений кислотности были рассчитаны показатели описательной статистики, в том числе эксцесс и коэффициент асимметрии со своими среднеквадратическими ошибками, позволявшие точно определить отсутствие или наличие отношения от нормального распределения.

Статистические параметры рабочего участка

Показатель	Значение
Количество отобранных образцов	343
Средний показатель pH_{KCl}	5,42
Максимальное значение pH_{KCl}	7,90
Минимальное значение pH_{KCl}	3,72
Мода	6,10
Медиана	5,34
Среднее квадратическое отклонение	0,87
Дисперсия	0,76
Коэффициент вариации pH , %	16,1
Асимметрия (А)	0,21
Ошибка асимметрии (mas)	0,13
Эксцесс (Е)	–0,73
Ошибка эксцесса (mE)	0,26

В связи с тем, что асимметрия выходит за пределы своей ошибки подтверждается правосторонняя асимметрия, об этом также говорят значение моды и медианы, 6,1 и 5,34 соответственно [8]. Значительно (практически в 3 раза) отклонение эксцесса (–0,73) от своей ошибки (+/–0,26), что подтверждает выдвинутый тезис о сглаженности значений кислотности (табл. 2). В связи с выявленным отклонением от нормального распределения pH_{KCl} и чувствительностью вариограмм к выбросам в данных было использовано логарифмическое преобразование данных для приближения к нормальному распределению данных [9].

Среднее значение кислотности полученных образцов 5,42, данный показатель незначительно ниже средней кислотности пахотных земель РБ [10]. Для выборки характерен большой разброс значений – от 3,72 до 7,90, благоприятными же значениями для выращивания тритикале являются значение 5,5–6,5.

Важной составляющей в анализе пространственной структуры данных является выявление детерминированной компоненты варьирования, что выражается в наличии общих почвенно-геохимических условий и направленностью перераспределения химических элементов на всей территории. Линия наилучшего соответствия (полином) проведена через проецируемые точки, показывая тренды в определенных направлениях – ось X отражает направление север-юг, а ось Y – запад-восток (рис. 2). Если бы линии были параллельны осям X (зеленая линия) или Y (синяя линия), это означало бы, что трендов нет [9]. Данные направления (тренды) могут быть описаны через регрессионные (линейные, параболические, синусоидные) графики и уравнения, которые автоматически добавляются в итоговую модель.

При анализе трендов на данной территории было выявлено пространственные зависимости (рис. 3), описываемые полиномом второго порядка (имеет параболическую форму), что также можно заметить на рисунке 1. На западе и востоке значение кислотности имеет более высокие значения, чем в центральной части, где сосредоточены очень кислые почвы, тем самым образуя параболу.

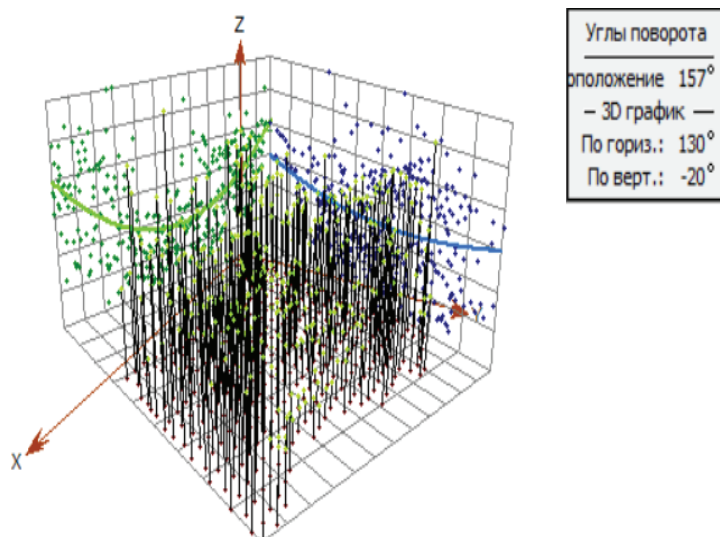


Рис.3. Линии пространственных трендов данных

На основе проанализированных данных можно построить экспериментальную вариограмму или же облако точек вариограммы. Однако экспериментальная вариограмма представляет собой дискретный набор точек, который нельзя подать на вход алгоритму для построения картограммы. Для того чтобы подать на вход алгоритму необходима теоретическая вариограмма. Теоретическая вариограмма – это математическая функция, которая аппроксимирует экспериментальную вариограмму [11]. При правильном подборе теоретической вариограммы, она будет описывать поведение используемых данных.

При подборе теоретической вариограммы были использованы экспоненциальная модель и модель J-Бесселя (рис. 4).

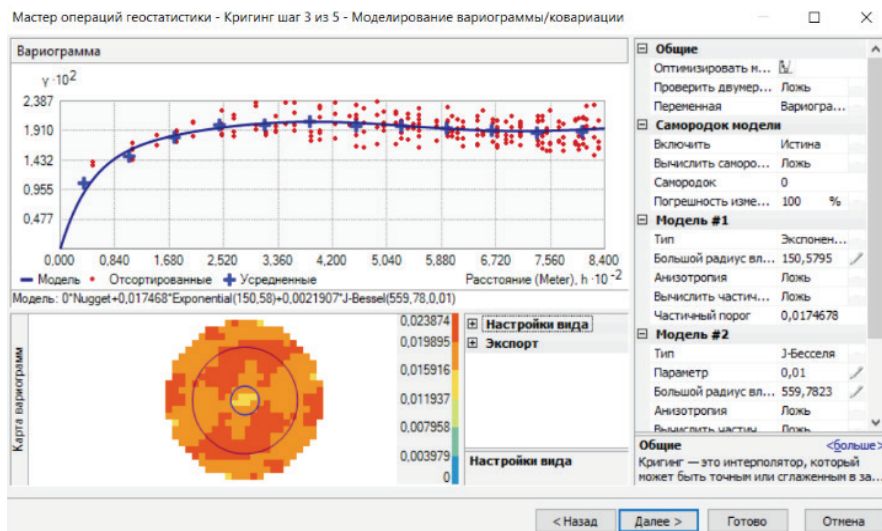


Рис.4. Теоретическая вариограмма

Выбор двух моделей обусловлен сложностью пространственного распределения показателей кислотности: использование одной модели оказалось недостаточным для точного описания распределения данных. Применение обеих моделей позволяет более корректно и точно учитывать большой и малый радиус влияния, что повышает точность интерполяции и улучшает качество пространственного моделирования. Эффект самородка (Nugget effect) – это выброс, который может включать такие атрибуты, как погрешности измерения или пространственные источники вариации на расстояниях [6], для данной вариограммы равен 0, это говорит о высокой точности, подобранной вариограммы.

В результате всех операций была получена картограмма кислотности (рис. 5). При визуальном анализе можно наблюдать параболическое распределение данных, это выражено более близкими значениями почвенной кислотности к нейтральной, на периферии участка и более кислыми почвами в центральной части – это заметно в направлениях юго-запад северо-восток и северо-запад юго-восток. Также на рабочем участке повсеместно наблюдаются мелко-контурные районы с нейтральной кислотной средой, их наличие связано с близким залеганием карбонатных пород. При этом классический метод сглаживает эти особенности, генерализируя данные и игнорируя мелкомасштабные вариации (рис. 6).

Стоимость отбора проб и лабораторного анализа по определению кислотности на 12.01.2023 г. составляет 7,50 руб. и 2,05 руб. соответственно, за один смешанный образец или же за один элементарный участок. Но при дальнейших подсчётах следует учитывать, что в стоимость отбора одного смешенного образца входят порядка 30 уколов буром. Поэтому для рабочего участка состоящего из 30 элементарных участков для целей отбора проб пришлось бы отобрать 900 уколов буром. Для отбора проб и лабораторного анализа в целях геостатистического метода было затрачено почти в 3 раза больше средств нежели классическим методом (табл. 3).

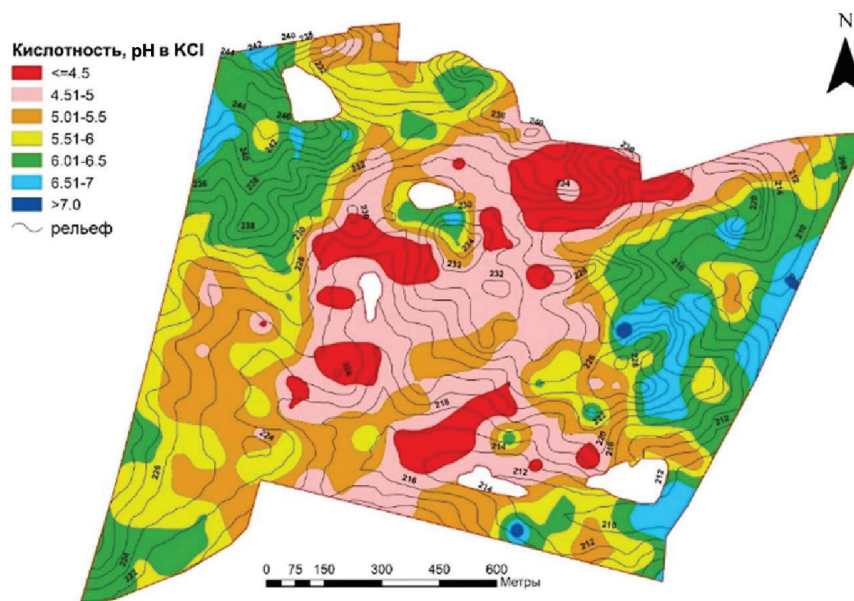


Рис. 5. Картограмма кислотности, построенная с применением методов геостатистики

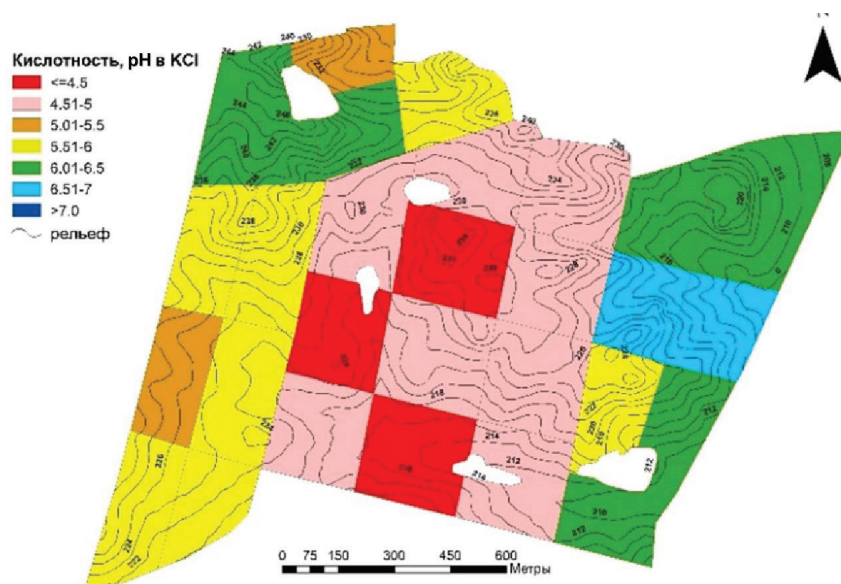


Рис. 6. Картосхема кислотности, построенная классическим методом

Таблица 3

Стоимость отбора и лабораторных анализов проб по двум методам

Показатель	Классическим методом	Геостатистическим методом
Количество проб, шт.	900	343
Стоимость отбора проб, руб.	225	86
Стоимость лабораторных анализов, руб.	62	703
Итоговая стоимость, руб.	287	789

На 12.01.2023 г. стоимость внесения 1 т CaCO_3 составляла 86 руб. [12], включая закупку, транспортировку и внесение. Указанная стоимость является усредненной и рассчитана приблизительно на основании доступных данных, что следует учитывать при интерпретации полученных результатов. Расчет доз внесения CaCO_3 выполнен по данным таблицы 1.

Затраты на внесения мелиоранта при применении геостатистического метода по сравнению с классическим методом увеличилась на 457 руб., или на 1,2 %, также обрабатываемая площадь увеличилась на 6,5 га (табл. 4). Однако с помощью инструмента «выявления изменений» и таблицы 1 было определено, что из 461,5 т CaCO_3 , внесенных по классическому методу, 127 т, или 27,5 % были потрачены на переизвесткование почв. Данный инструмент анализировал разницу между двумя картограммами кислотности, созданными для классического и геостатистического методов, что позволило выявить зоны избыточного и недостаточного внесения мелиоранта. Внесение слишком большого количества извести может привести к чрезмерному повышению pH почвы (ее подщелачиванию). Это в свою очередь

приведет к дефициту микроэлементов, таких как железо, марганец, медь и цинк, которые плохо усваиваются при высоком pH. Помимо этого, рабочий участок не будет произвесткован в полном объеме, там, где он в этом нуждается, а это потребует дополнительно 132,3 т мелиоранта.

Таблица 4

Затраты на проведение известкования по двум методам

Затраты на известкование по классическому способу агрохимического обследования						
Группа почв	Гумус, %	pH _{KCl}	CaCO ₃ , т/га	Площадь, га	CaCO ₃ , т	Затраты, руб.
Связносупесчаные	1,01–1,5	≤ 4,5	6,25	21,5	134,4	11558
Связносупесчаные	1,01–1,5	4,51–5	5,25	49,8	261,5	22489
Песчаные	1,01–1,5	4,51–5	3,75	7,2	27,0	2322
Связносупесчаные	1,01–1,5	5,01–5,5	4,25	4,5	19,1	1643
Рыхлосупесчаные	1,01–1,5	5,01–5,5	3,25	6,0	19,5	1677
Почвы, не нуждающиеся в известковании				91,7	–	–
Сумма				180,7	461,5	39689
Затраты на известкование по агрохимическому обследованию с применением геостатистических методов						
Связносупесчаные	1,01–1,5	< 4,25	6,5	4,3	28	2408
Связносупесчаные	1,01–1,5	4,25–4,5	6,0	12,2	73,2	6295
Песчаные	1,01–1,5	4,25–4,5	4,5	0,8	3,6	310
Связносупесчаные	1,01–1,5	4,51–4,75	5,5	18,2	100,1	8609
Песчаные	1,01–1,5	4,51–4,75	4,0	0,5	2,0	172
Связносупесчаные	1,01–1,5	4,76–5	5,0	20,7	103,5	8901
Песчаные	1,01–1,5	4,76–5	4,0	0,1	0,4	34
Рыхлосупесчаные	1,01–1,5	4,76–5	3,5	0,4	1,4	120
Связносупесчаные	1,01–1,5	5,01–5,25	4,5	16,5	74,3	6390
Песчаные	1,01–1,5	5,01–5,25	3,5	1,3	4,6	396
Рыхлосупесчаные	1,01–1,5	5,01–5,25	3,0	0,7	2,1	181
Связносупесчаные	1,01–1,5	5,26–5,5	4,0	14,4	57,6	4954
Песчаные	1,01–1,5	5,26–5,5	3,0	5,0	15,0	1290
Рыхлосупесчаные	1,01–1,5	5,26–5,5	2,5	0,4	1,0	86
Почвы, не нуждающиеся в известковании				85,2	–	–
Сумма				180,7	466,8	40146

В итоге для проведения известкования, на данном рабочем участке, на проведение работ по известкованию, пришлось бы затратить 39689 руб. и 40146 руб., в пересчете на рубли за гектар – 220 руб./га и 222 руб./га для классического и геостатистического методов соответственно. При этом детальный учет кислотности позволит через несколько лет выровнять значения pH на данной территории, что приведет к увеличению урожайности, и как следствие – прибыли. Кроме этого, при использовании установленных способов внесения средств химизации в стране, различия в значениях кислотности почвы на данном участке, будет увеличиваться, что приведет к снижению общей урожайности с рабочего участка.

ВЫВОДЫ

Применение геостатистических методов помогает отобразить обстановку на рабочем участке, максимально приближенную к реальному, с учетом всех пространственных вариаций кислотности почвы. На интерполяционной карте четко видны мелко-контурные участки с нейтральной кислотностью, которые сформировались в результате подщелачивания карбонатными породами, создавая локализованные «самородки». В отличие от этого, классический метод сглаживает эти особенности, генерализируя данные и игнорируя мелкомасштабные вариации.

Затраты на отбор проб и лабораторные анализы увеличились бы на 502 руб. или же 2,75 раза для геостатистического метода, а общие затраты на проведение работ по известкованию с учетом закупки, транспортировки и внесения, а также отбора проб и лабораторных анализов составили 39 976 руб. и 40 935 руб., в пересчете на рубли за гектар – 221 руб./га и 227 руб./га соответственно для классического и геостатистического методов. Однако из 39976 руб., потраченных по классическому методу, эффективно было бы использовано лишь 72,5 %, в то время как оставшаяся часть была бы потрачена на переизвесткование, которое не только неэффективно расходует денежные средства, но и может негативно сказаться на состоянии растительности. Кроме того, несмотря на затраченные средства, на рабочем участке останется дефицит в 132,3 т CaCO_3 , необходимых для полноценного известкования почвы, если следовать инструкции по известкованию кислых почв сельскохозяйственных земель.

Несмотря на более высокие затраты в 959 руб., для данного рабочего участка предусмотрено в перспективе внесение мелиоранта по картограммам кислотности, построенным по методу геостатистики. Это поможет его вносить не только эффективно количественно (в необходимом объеме), но и качественно (в нужном месте), что в итоге приведет к выравниванию неоднородности почвенной кислотности.

Также важно отметить, что каждый отдельно взятый рабочий участок уникальный и распределение почвенных свойств в данном масштабе не может быть с высокой точностью экстраполировано на участки, где исследования не проводились. Проводимые ранее опыты на территории Беларуси на отдельно взятых участках показывали по сравнению с установленным методом агрохимического обследования значительное снижение затрат с 420 т до 210 т доломитовой муки, что на 12.01.2023 г. составляло бы снижение затрат с 36120 руб. до 18060 руб. для рабочего участка размером 106 га [13] и с 17588 до 13099 руб. для рабочего участка размером 119,7 га (без учета отбора образцов и лабораторных анализов) [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клебанович, Н. В. Почвоведение и земельные ресурсы : учеб. пособие / Н. В. Клебанович. – Минск: БГУ, 2013. – 343 с.
2. Клебанович, Н.В. География кислотности пахотных почв Беларуси / Н. В. Клебанович // Химия. Биология. География. – Минск : БГУ, 2006. – С. 92–97.
3. Сельское хозяйство Республики Беларусь. Статистический сборник [сайт] / Национальный статистический комитет РБ, Гос. Комитет по имуществу РБ, 2023 – Минск, 2023. – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnayastatistika/publications/izdania/public_brochures/index_77214/ (дата обращения: 01.11.2024).
4. Сельское хозяйство Республики Беларусь. Статистический сборник [сайт] / Национальный статистический комитет РБ, Гос. Комитет по имуществу РБ, 2019 – URL: Минск, 2019. – https://www.belstat.gov.by/ofitsialnayastatistika/publications/izdania/public_compilation/index_14022/?sphrase_id=2114195 (дата обращения: 01.11.2024).
5. Шашко, Ю. К. Плодородие почв – основа продовольственной безопасности государства: Материалы VI съезда Белорусского общества почвоведов и агрохимиков, Минск, 21 июля 2022 г. / Ю. К. Шашко [и др.] // Институт почвоведения и агрохимии, Белорусское общество почвоведов и агрохимиков – Минск, 2022. – С. 54–58.
6. Кынышев, С. К. Основные элементы и понятия геостатистики / С. К. Кынашев, С. А. Баранов. – Республика Казахстан, 2015 г. – 15 с.
7. Инструкция по известкованию кислых почв сельскохозяйственных земель / В. В. Лапа, Г. В. Пироговская, И. М. Богдевич [и др.]. – Минск : Ин-т почвоведения и агрохимии, 2019. – 31 с.
8. Чертко, Н. К. Математические методы в географии : уч.-метод. пособие / Н. К. Чертко, А. А. Карпиченко. – Минск : Белорусский государственный университет, 2009. – С. 10–38.
9. Клебанович, Н. В. Геостатистический анализ при картографировании пространственной неоднородности влажности и кислотности почв / Н. В. Клебанович, А. Л. Киндеев, А. А. Сазонов // Геосферные исследования. – 2021. – С. 80–91.
10. Клебанович, Н. В. Известкование почв Беларуси / Н. В. Клебанович, Г. В. Васильюк. – Минск : Белорусский государственный университет 2003. – 322 с.
11. Моделирование оптимальной теоретической вариограммы мощности пласта на основе группового учета аргументов / Д. Н. Шурыгин, С. В. Власенко, Д. С. Шастик [и др.] // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014 г. – № 4. – С. 76–78.
12. Интернет-магазин доломитовой продукции [сайт] / ОАО «Доломит» – URL: <https://dolomit.by/shopper/catalog/> (дата обращения: 12.01.2023).
13. Киндеев А. Л. Перспективные направления геостатистического анализа и стохастического моделирования с учетом экономических издержек при точном земледелии / А. Л. Киндеев // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2022. – № 2. – С. 59–70.
14. Воробей, М. В. Геостатистический анализ внутриспольной неоднородности почвенной кислотности для проведения работ по известкованию / М. В. Воробей, А. Л. Киндеев // Почвоведения и агрохимия. – 2024. – № 1(72). – С. 27–34.

**APPLICATION OF GEOSTATISTICAL APPROACH IN ACCOUNTING
FOR INTRA-FIELD HETEROGENEITY SOIL ACIDITY IN LIMING
OF AGRICULTURAL LANDS**

M. V. Vorobei, A. L. Kindeev

Summary

The article presents the main stages of mapping agrochemical properties of soils by geostatistical method on the example of soil acidity. The comparison of costs for carrying out works on liming of arable land by classical and geostatistical method of mapping soil acidity on the example of JSC «Koshelevo-Agro» is carried out. The following were taken into account: cost of sampling and laboratory analysis; costs of liming.

The total cost of liming works, including procurement, transportation and application, as well as sampling and laboratory analyses, was 39976 BYN for the classical method and 40935 BYN for the geostatistical method, which is 959 BYN more. However, using the classical method, only 72,5 % of the amount spent would have been effectively utilized.

Поступила 11.11.24