

## ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВНУТРИПОЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЧВЕННОЙ КИСЛОТНОСТИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО ИЗВЕСТКОВАНИЮ

М. В. Воробей, А. Л. Киндеев

*Белорусский государственный университет,  
г. Минск, Беларусь*

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение плодородия почвы является важной задачей для современного сельского хозяйства, особенно в условиях увеличения населения и ограниченных земельных ресурсов. Эффективное управление плодородием почвы необходимо для обеспечения высокой урожайности и устойчивости сельского хозяйства, что напрямую влияет на продовольственную безопасность и адаптацию к изменению климата. В Беларуси за период с 2010 по 2020 гг. урожайность зерновых и зернобобовых культур увеличилась с 27,7 до 35 ц/га [1], что свидетельствует о значительных улучшениях в агротехнологиях и управлении почвенными ресурсами.

Одним из важнейших показателей плодородия является кислотность почвы, которая оказывает существенное влияние на здоровье почвенной среды, рост и развитие растений, а также эффективность использования удобрений, поскольку от показателя кислотности зависит усвояемость микро-и макроэлементов [2].

В большинстве развитых странах мира учет неоднородности свойств почвенного покрова применяется при дифференцированном внесении удобрений и является основой точного земледелия. В таких странах как США, Канада, Германия, Австралия, точное земледелие активно внедряется и исследуется в ведущих аграрных университетах и институтах. При этом применение дифференцированного внесения удобрений позволило сократить их использование в среднем на 15–20 %, а урожайность увеличить на 5–10 %.

В свою очередь, в республике при агрохимическом обследовании сельскохозяйственных земель, с одного элементарного участка отбираются 20–35 уколов общим весом 0,6 кг, из которых отбирается смешанный образец [3]. Данная методика была востребована при проведении сельскохозяйственных работ на территории Республики Беларусь во второй половине XX века, когда проводились крупномасштабные почвенные и агрохимические обследования по всей стране. В ходе данных мероприятий было установлена необходимость повсеместного известкования 83,0 % пахотных земель. За последующие 40 лет в почвы Беларуси внесено примерно 150 млн т  $\text{CaCO}_3$ , что составляет в среднем 15–20 т/га и к концу 2010 г. только 5,2 % пашни имели рН менее 5,0 [4]. После чего государственное финансирование работ по химической мелиорации прекратилось и за последние 10–15 лет задел, который был создан, постепенно уменьшается, и в настоящее время возникает необходимость проведения подобных работ, но уже с использованием современных технологий, основанных на методах точного земледелия, данных дистанционного зондирования и геоинформационных систем.

Одним из современных направлений пространственного анализа кислотности и других агрохимических свойств почв в локальном масштабе при применении технологий точного земледелия является геостатистика. Она представляет собой научно-методический аппарат анализа данных, базирующийся на теории вероятности и позволяющий выразить случайное явление в пространстве и/или времени через математико-статистические величины, а также классифицировать закономерности их распределения.

Интерполяционные поверхности, полученные при применении методов геостатистики представляют собой наименьшую несмещенную погрешность [5], т. е. прогноз имеет минимальные ошибки. В связи с этим точное (точечное) позиционирование сельскохозяйственной техники и внесение средств химизации позволяет оптимизировать расходы 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 кислотности почвы при проведении известкования.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются почвы рабочего участка, находящегося вблизи деревни Радюки, ОАО «Кошелево-Агро» Новогрудского района Гродненской области. Предметом исследования является внутрипольная неоднородность кислотности почв. На рабочем участке преобладают почвы дерново-подзолистые рыхлосупесчаные, развивающиеся на моренных суглинках, со средним содержанием гумуса – 2,5 %. Участок расположен на склоне с перепадом высот 40 м, общая площадь составляет 119,7 га.

Для картографирования кислотности почвы с использованием геостатистических методов необходимо: произвести отбор проб и лабораторный анализ; проанализировать пространственное распределение полученных данных и произвести подбор вариограммы для оценки пространственной зависимости между значениями кислотности почвы; провести кросс-валидацию полученных результатов и составить картографических материал на основе получившихся моделей вариограмм и их ошибок.

Отбор проб проводился в середине сентября, после сбора урожая тритикале. Пробы отбирались на глубине 0–20 см, по предварительно созданной сетке точек, с шагом 70 м (рис.1). Всего было отобрано 229 образцов с плотностью пробоотбора около 2-х образцов на 1 га. Для данного исследования определение pH солевой вытяжки проводилось по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483) при помощи pH-метра-милливольтметра pH-150M. Экспериментальные данные были занесены в таблицы Excel, где была определена нормальность распределения. Все операции по построению вариограмм и интерполяции проводились в программном продукте компании ESRI, ArcMap в модуле Geostatistical Analyst.

Для изучения целесообразности учета внутрипольной неоднородности кислотности почв, использовались «Картограмма кислотности, содержания фосфора, калия и гумуса в почвах» и «Почвенная карта 10 000 масштаба», они были получены по запросу в ОАО «Кошелево-Агро».

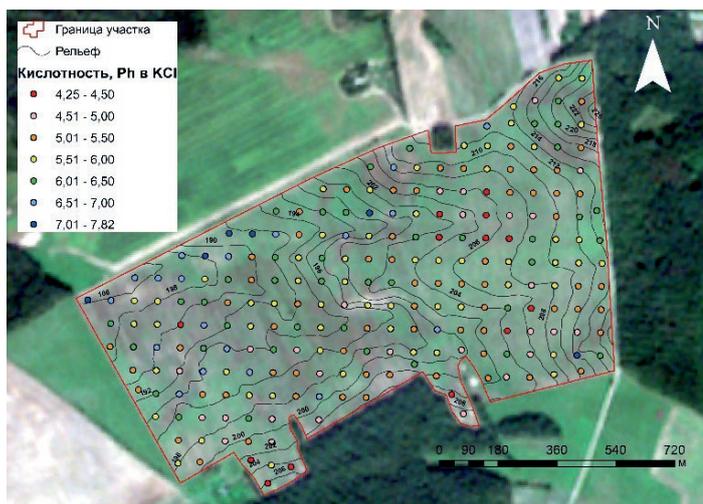


Рис. 1. Сетка точек отобранных образцов

На основе полученных данных и интерполяции были высчитаны затраты на проведение известкования, эффективность внесения мелиоранта по классическому агрохимическому обследованию сельскохозяйственных земель (табл. 1).

Таблица 1

**Дозы известковых мелиорантов (т/га CaCO<sub>3</sub>) для известкования кислых почв пахотных земель (фрагмент) [6]**

Группы почв	Содержание гумуса, %	pH 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
Рыхлосупесчаные	≤ 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
Связносупесчаные	≤ 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

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По средствам математических методов, рассмотрев гистограмму распределения данных (рис. 2), мы наблюдаем приближенный к нормальному распределению ряд данных. Но в связи с тем, что асимметрия выходит за пределы своей ошибки, наблюдается правосторонняя асимметрия [7]. Эксцесс приближен к 0 и не выходит за пределы своей ошибки, показатели медианы и моды имеют почти одинаковое значение 5,58 и 5,6 соответственно (табл. 2). Если бы отклонение от нормального распределения оказалось существенным пришлось бы прибегнуть к преобразованию данных [8].

Среднее значение кислотности полученных образцов 5,64, данный показатель незначительно ниже средней кислотности пахотных земель Беларуси [9]. Для выборки характерен большой разброс значений от 4,25 до 7,82, благоприятными же значениями для выращивания тритикале являются значения 5,5–6,5. При анализе тренда было выявлено линейное удаление (рис. 2). Линия наилучшего соответствия (полином) проведена через проецируемые точки, показывая тренды в определенных направлениях. Если бы линии были параллельны осям X (зеленая линия) или Y (синяя линия), это означало бы, что трендов нет [8]. Тренды будут включены в расчеты перед созданием результирующей поверхности.

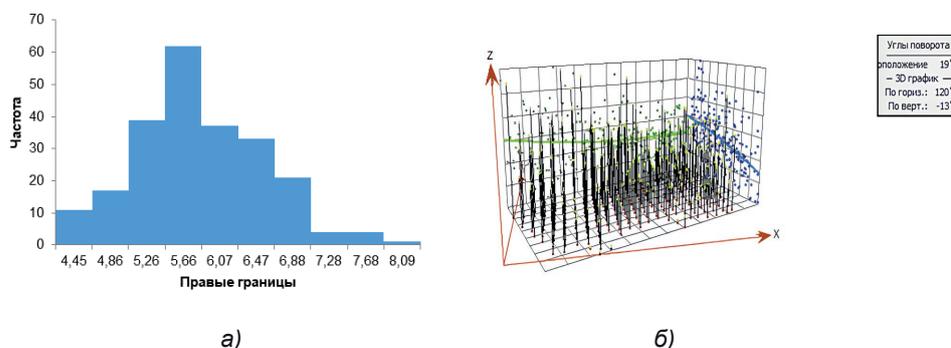


Рис. 2. а – гистограмма распределения данных, б – линии тренда

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 [10]. При правильном подборе теоретической вариограммы, она будет описывать поведение используемых данных.

Таблица 2

**Статистические параметры рабочего участка**

Показатель	Значение
Количество проб	229
Среднее, pH	5,64
Максимальное значение	7,82
Минимальное значение	4,25
Мода	5,60
Медиана	5,58
Среднее квадратическое отклонение	0,70
Дисперсия	0,49
Коэффициент вариации pH, %	12,40
Асимметрия (A)	0,40
ошибка асимметрии (mas)	0,16
Эксцесс (E)	0,10
Ошибка эксцесса (mE)	0,32

При подборе теоретической вариограммы была применена устойчивая модель (рис. 3), она наиболее точно описывает поведение данных. При этом большой радиус влияния равен 840 м это значит, что весь участок в направлении юго-запад северо-восток автокоррелирован. Однако расстояние автокорреляции по направлению юго-запад северо-восток уменьшается до 248 м. Это связано с влиянием анизотропий, само же наличие анизотропий предположительно вызвано гипсометрией рельефа и движением сельскохозяйственной техники.

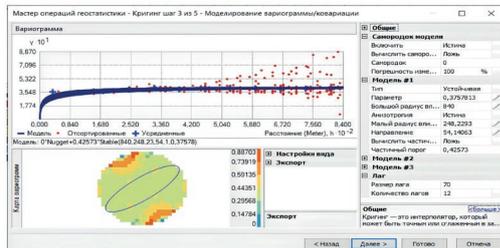


Рис. 3. Теоретическая вариограмма

Частичный порог – это порог минус самородок, для данной вариограммы он равен 0,43. Значение, в котором модель вариограммы достигает диапазона (значение на оси y), называется порогом. Диапазон – это расстояние, при котором модель начинает выравниваться. Эффект самородка (Nugget effect) – это выброс который может включать такие атрибуты, как погрешности измерения или пространственные источники вариации на расстояниях [5], для данной вариограммы равен 0. Следовательно остаточная дисперсия равна 0, это говорит о высокой точности, подобранной вариограммы.

В результате всех операций была получена картограмма кислотности (рис. 4). При визуальном осмотре явно наблюдается анизотропия: в направлении северо-запад юго-восток наблюдается линейное изменение кислотности на протяжении всего участка, а в перпендикулярном направлении такая тенденция не прослеживается. Также при сравнениях картограмм кислотности, построенных по классическому и геостатистическому методу заметно, что более реальную обстановку на поле отображает картограмма, построенная с помощью геостатистического подхода.

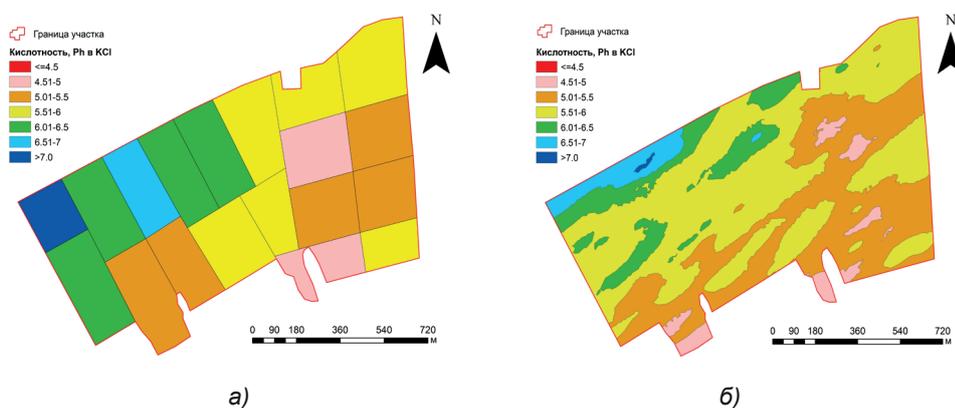


Рис 4. Картограмма кислотности (а – построенная классическим методом, б – с применением методов геостатистики)

Стоимость отбора проб и лабораторного анализа по определению кислотности на 12.01.2023 г. составляет 7,5 руб. и 2.05 руб. соответственно. Но при дальнейших подсчётах следует учитывать, что в стоимость отбора одного смешенного образца входят около 30 уколов буром. Для отбора проб и лабораторного анализа в целях геостатистического метода было затрачено в 2,9 раза больше средств, чем на классический метод (табл. 3).

Таблица 3

**Стоимость отбора и лабораторного анализа проб по двум методам, руб.**

Показатель	Классический метод	Геостатистический метод
Количество проб	19	229
Стоимость отбора проб	143	57
Стоимость лабораторных анализов	39	469
Итоговая стоимость	182	526

На 12.01.2023 г. стоимость внесения 1 т CaCO<sub>3</sub> составляла 86 руб., включая закупку, транспортировку и внесение. Расчет доз внесения CaCO<sub>3</sub> выполнен по данным таблицы 1. Применение геостатистического метода по сравнению с классическим методом, позволило сократить количество необходимого CaCO<sub>3</sub> на 56,2 т и обрабатываемую площадь на 2,9 га. Это привело к снижению затрат на 28 %, или на 4 833 руб. (табл. 4). Экономия в пересчете на рубли за гектар, с учетом отбора проб и лабораторных анализов, составила 36 руб./га, 147 руб./га и 109 руб./га для классического и геостатистического методов соответственно.

Таблица 4

**Затраты на проведение известкования по двум методам**

Группа почв	Гумус, %	pH <sub>KCl</sub>	CaCO <sub>3</sub> , т/га	Площадь, га	CaCO <sub>3</sub> , т	Затраты, руб.
по классическому способу агрохимического обследования						
Связносупесчаные	1,51–2	4,51–5	5,25	5,8	30,5	2623
Связносупесчаные	2,01–2,5	4,51–5	6,25	6,8	42,5	3655
Рыхлосупесчаные	2,01–2,5	5,01–5,5	3,75	34,5	129,4	11128
Почвы не нуждающиеся в известковании				72,6	–	–
Сумма				119,7	202,4	17406
по агрохимическому обследованию с применением геостатистического метода						
Песчаные	2,01–2,5	4,5–4,75	4,5	0,1	0,5	43
Связносупесчаные	1,51–2	4,76–5	5	0,4	2	172
Рыхлосупесчаные	2,01–2,5	4,76–5	4	2,5	10	860
Песчаные	1,51–2	4,76–5	3,5	1,7	6	516
Связносупесчаные	1,51–2	5,01–5,25	4,5	2	9	774
Рыхлосупесчаные	1,51–2	5,01–5,25	3,5	11,4	39,9	3431
Песчаные	2,01–2,5	5,01–5,25	3	1,4	4,2	361
Связносупесчаные	1,51–2	5,26–5,5	4	1,2	4,8	413
Рыхлосупесчаные	2,01–2,5	5,26–5,5	3	22	66	5676
Песчаные	1,51–2	5,26–5,5	2,5	1,5	3,8	327
Почвы не нуждающиеся в известковании				75,5	–	–
Сумма				119,7	146,2	12573

Затраты на проведение известкования с учетом неоднородности почвенного покрова оказались ниже, чем по классическому методу. Но геостатистический подход позволяет вносить  $\text{CaCO}_3$  эффективно, не только количественно (в необходимом объеме), но и качественно (в нужном месте). Из 202,4 т внесенных бы на поле по классическому методу: эффективно (сколько необходимо) внесено 65,3 %; недоизвестковано (необходимы большие дозы) – 4,1 %; переизвестковано (необходимы меньшие дозы или вообще нет необходимости в проведении) – 30,6 %.

## ВЫВОДЫ

Применение геостатистических методов помогает значительно повысить точность картографирования почвенных характеристик. В данном исследовании использование методов геостатистики позволило бы сократить количество необходимого  $\text{CaCO}_3$  на 56,2 т, и обрабатываемую площадь – на 2,9 га. Несмотря на более высокие затраты на отбор проб и лабораторные анализы в 2,9 раза дороже, чем для классического метода, затраты на известкование включая: закупку, транспортировку, внесение, отбор проб и лабораторные анализы в пересчете на гектар оказываются ниже, чем при применении классического метода. А именно 109 руб./га вместо 147 руб./га соответственно. Общие затраты на проведение известкования, без учета отбора проб и лабораторного анализа, сократились с 17 406 руб. до 12 573 руб., экономия средств составила 4 833 руб., или 28 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сельское хозяйство Республики Беларусь. Статистический сборник [Электронный ресурс] – Минск, 2021. – 179 с. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/241/241db6e8c967173-2fede4b275828d2ae.pdf>. – Дата доступа: 14.04.2024.
2. Плодородие почв – основа продовольственной безопасности государства: материалы VI съезда Белорусского общества почвоведов и агрохимиков, Минск, 21 июля 2022 г. / Институт почвоведения и агрохимии, Белорусское общество почвоведов и агрохимиков; редкол.: Ю. К. Шашко [и др.]. – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2022. – С. 54–58.
3. Клебанович, Н. В. Почвоведение и земельные ресурсы: учеб. пособие / Н. В. Клебанович. – Минск: БГУ, 2013. – 343 с.
4. Клебанович, Н. В. География кислотности пахотных почв Беларуси // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 2006. – № 1. – С. 92–97.
5. Кынашев, С. К. Основные элементы и понятия геостатистики / С. К. Кынашев, С. А. Баранов. – Республика Казахстан, 2015 г. – 15 с.
6. Инструкция по известкованию кислых почв сельскохозяйственных земель / В. В. Лапа [и др.] – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2019. – 31 с.
7. Математические методы в географии: учебно-методическое пособие / Н. К. Чертко, А. А. Карпиченко. – Минск: БГУ, 2009. – С. 10–38.
8. 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 г. – № 3. – С. 80–91.

9. Клебанович, Н. В. Известкование почв Беларуси / Н. В. Клебанович, Г. В. Васильюк. – Минск: БГУ, 2003. – 322 с.

10. Моделирование оптимальной теоретической вариограммы мощности пласта на основе группового учета аргументов / Д. Н. Шурыгин [и др.]. – Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014 г. – № 4. – С. 76–78.

## **EXPEDIENCY OF TAKING INTO ACCOUNT INTRA-FIELD HETEROGENEITY OF SOIL ACIDITY IN LIMING OPERATIONS**

**M. V. Vorobei, A. L. Kindeev**

### **Summary**

The article presents the main stages of mapping of agrochemical properties by geostatistical method on the example of soil acidity. The comparison of classical and geostatistical methods of soil acidity mapping for the study area was carried out. The comparison was made by the following indicators: cost of sampling and laboratory analysis, costs of liming. Geostatistical method, despite higher costs of sampling and laboratory analysis, 2.9 times more expensive than the classical method, would reduce the cost of liming from 147 rub./ha to 109 rub./ha.

*Поступила 20.05.24*