

Н.В. Клебанович¹, А.Л. Киндеев², В.С. Кизеева³

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПЛОЩАДНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЗОН ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

АННОТАЦИЯ

В статье приводится один из возможных вариантов улучшения методики выделения зон потенциального плодородия почвенного покрова. Доказывается необходимость использования площадной интерполяции как единственного метода геостатистического анализа, учитывающего площадь входных объектов. Для проверки данных на нормальное распределение Гаусса необходимо использовать несколько способов проверки, так как при оценке только статистических параметров были обнаружены значительные (в случае с фосфором – аномальные) отклонения, однако при оценке гистограмм и графиков «квартиль-квартиль» необходимость приведения данных к нормальному распределению была актуальна только для гумуса и фосфора. Показываются основные преимущества и недостатки метода площадной интерполяции. При значительном отклонении от нормального распределения, при отсутствии встроенных функций автоматизированного приведения данных к распределению Гаусса, одним из немногих способов может служить логарифмирование данных. После проведения зонирования необходимо выполнить обратный перевод в исходные значения для репрезентативной визуализации результатов.

В результате подбора теоретических вариограмм-деконволюций определены степени пространственной зависимости и оптимальные расстояния для исследуемых свойств. Определено, что лаг у показателей кислотности и содержания калия равняется 1000 м и 1050 м соответственно. У фосфора он составляет 1300 м. У содержания гумуса лаг значительно ниже – 440 м. Максимальное расстояние автокорреляция характерно для калия и гумуса – 2330 и 1528 м; минимальное – для фосфора – 637. Достоверность картограмм агрохимических свойств подтверждается рассчитанными среднеквадратическими ошибками. Отклонения значений рН находится в диапазоне до 0,15 единиц. Наивысшая среднеквадратическая ошибка интерполяции наблюдается у слабокислых почв. Ошибка проинтерполированных значений гумуса от исходных данных присуща антропогенно-преобразованным почвам. Среднеквадратическую ошибку значений фосфора можно оценить как незначительную. Наибольшие ошибки у K_2O – в единичных случаях они достигают 120 мг/га в центральной и в восточной частях района. По полученной карте потенциального плодородия почв была определена взаимосвязь с гранулометрическим составом почв. Низкий уровень наблюдается на песчаных и супесчаных почвах, высокий – на суглинках. Также на производительную способность влияет рельеф территории – на расчлененных участках продуктивность ниже, чем на равнинных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, геостатистика, варьирование, площадная интерполяция, производительная способность почвы.

¹ Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики, Ленинградская, 14, 220004, Минск, Беларусь *e-mail*: N_Klebanovich@inbox.ru

² Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики, Ленинградская, 14, 220004, Минск, Беларусь *e-mail*: akindeev@tut.by

³ Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики, Ленинградская, 14, 220004, Минск, Беларусь *e-mail*: tatya.novikova.85@mail.ru

Nikolay V. Klebanovich¹, Arkady L. Kindeev², Vitalina S. Kizeeva³

APPLICATION OF AREAL INTERPOLATION METHODS WHEN DETERMINING ZONES OF POTENTIAL FERTILITY OF SOILS OF AGRICULTURAL LANDS

ABSTRACT

The article presents one of the possible options for improving the methodology for identifying zones of potential soil fertility. The necessity of using areal interpolation as the only method of geostatistical analysis that takes into account the area of input objects is proved. To check the data for a Gaussian normal distribution, it is necessary to use several verification methods, since when evaluating only statistical parameters, significant (in the case of phosphorus, abnormal) deviations were found, however, when evaluating histograms and quartile-quartile plots, it is necessary to bring the data to a normal distribution was relevant only for humus and phosphorus. The main advantages and disadvantages of the areal interpolation method are shown. With a significant deviation from the normal distribution, in the absence of built-in functions for automated reduction of data to the Gaussian distribution, one of the few ways can be the logarithm of the data. After zoning, it is necessary to perform a reverse translation to the original values for a representative visualization of the results. As a result of the selection of theoretical semivariograms-deconvolutions, the degrees of spatial dependence and optimal distances for the studied properties are determined. It is clear that the lag of acidity and potassium content is 1000 m and 1050 m, respectively. For phosphorus, it is 1300 m. For the humus content, the lag is much lower – 440 m. The maximum autocorrelation distance is typical for potassium and humus – 2330 and 1528 m; the minimum for phosphorus is 637. The reliability of the cartograms of agrochemical properties is confirmed by the calculated root-mean-square errors. The deviations of pH values are in the range of up to 0.15 units. The highest mean square error of interpolation is observed in weakly acidic soils. The error in the interpolated values of humus from the initial data is inherent in anthropogenically transformed soils. The root-mean-square error of phosphorus values can be estimated as insignificant. The largest errors in K₂O – in isolated cases, they reach 120 mg/ha in the central and eastern parts of the region. The resulting map of potential soil fertility was used to determine the relationship with the granulometric composition of soils. A low level is observed on sandy and sandy loam soils, a high level – on loams. Also, the productivity is affected by the relief of the territory – in the dissected areas, productivity is lower than on the plains.

KEYWORDS: GIS, geostatistics, variation, areal interpolation, soil productivity.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных целей устойчивого развития Республики Беларусь до 2030 года является модернизация аграрно-промышленного комплекса (АПК) в сфере сельского хозяйства, сохранения природно-ресурсного потенциала, поддержания экологической безопасности и благоприятной окружающей среды, а также сохранение и устойчивое использование биологического и ландшафтного разнообразия.

¹ Byelorussian State University, Faculty of Geography and Geoinformatics, Leningradskaja, 14, 220004, Minsk, Belarus *e-mail*: N_Klebanovich@inbox.ru

² Byelorussian State University, Faculty of Geography and Geoinformatics, Leningradskaja, 14, 220004, Minsk, Belarus *e-mail*: akindeev@tut.by

³ Byelorussian State University, Faculty of Geography and Geoinformatics, Leningradskaja, 14, 220004, Minsk, Belarus *e-mail*: tatya.novikova.85@mail.ru

Для достижения этих целей необходимо постоянное обеспечение АПК новыми эффективными адаптированными ресурсосберегающими технологиями и методиками, направленными на охрану агроландшафтов от деградаций, и повышение продуктивности агроценозов [Клебанович, 2019]. Неотъемлемым этапом организации рационального природопользования является комплексный учёт природно-экологических условий, проявляющихся в продукционной способности и экологической устойчивости структурных единиц почвенного покрова – почвенных комбинаций агроландшафтов – генетически однородных территориальных систем, состоящих из взаимосвязанных агрогенных комплексов [Черныш, 2005].

Одним из возможных путей оптимизации аграрного землепользования Республики Беларусь является учёт пространственной неоднородности почвенного покрова и его агрохимических характеристик, которые непосредственно влияют и лимитируют производительную способность почв. Исходя из этого появляется необходимость разработки методики учёта этих показателей при проведении землеустроительных работ и кадастровой оценки земель.

В Республике Беларусь исследования в этом направлении ведутся довольно давно, так, были рассмотрены вопросы по геоинформационному сочетанию накопленных к настоящему времени данных о структурно-агрегатном составе и агрофизических свойствах почв в агроландшафтах республики и информации о фактическом использовании земель сельскохозяйственного назначения с учетом их мелиоративного состояния и геосистемного положения [Червань и др., 2016]. Интересным представляется методика О.А. Куцаевой, базирующаяся на функциональных возможностях геостатистического анализа, разработанная для внутрихозяйственного землеустройства с целью перехода от формирования рабочих участков к формированию менеджмент-зон [Куцаева, 2020] на основе агрохимических характеристик.

Целью настоящего исследования, в связи с этим, является совершенствование методики дифференциации сельскохозяйственных земель по совокупности агрохимических свойств при помощи геостатистических методов интерполяции, анализ пространственно-географических закономерностей в их распределении и типизация сельскохозяйственных земель Воложинского района по производительной способности почвенного покрова.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы. Исходными материалами для исследования послужили данные земельно-информационной системы (ЗИС) Республики Беларусь об агрохимических свойствах почвы сельскохозяйственных земель Воложинского района, а также данные крупномасштабного почвенного картографирования почв района¹. Общая структура элементарных участков представлена на рис. 1.

Общая площадь сельскохозяйственных земель составляет 76853 га, что составляет 48 % от общей площади района. Количество элементарных участков – 14428. По данным крупномасштабного почвенного картографирования была составлена карты типов почв и гранулометрического состава (рис. 2) согласно разработанному в Республике Беларусь ТКП 651–2020 (33520)².

¹ Геопортал ЗИС. УП «Проектный институт Белгипрозем. Электронный ресурс: <https://gismap.by/next/> (дата обращения 05.04.2021).

² Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь. Национальный фонд технических нормативных правовых актов. Электронный ресурс: <https://tnpa.by/#!/DocumentCard/490371/622805> (дата обращения 05.04.2021).

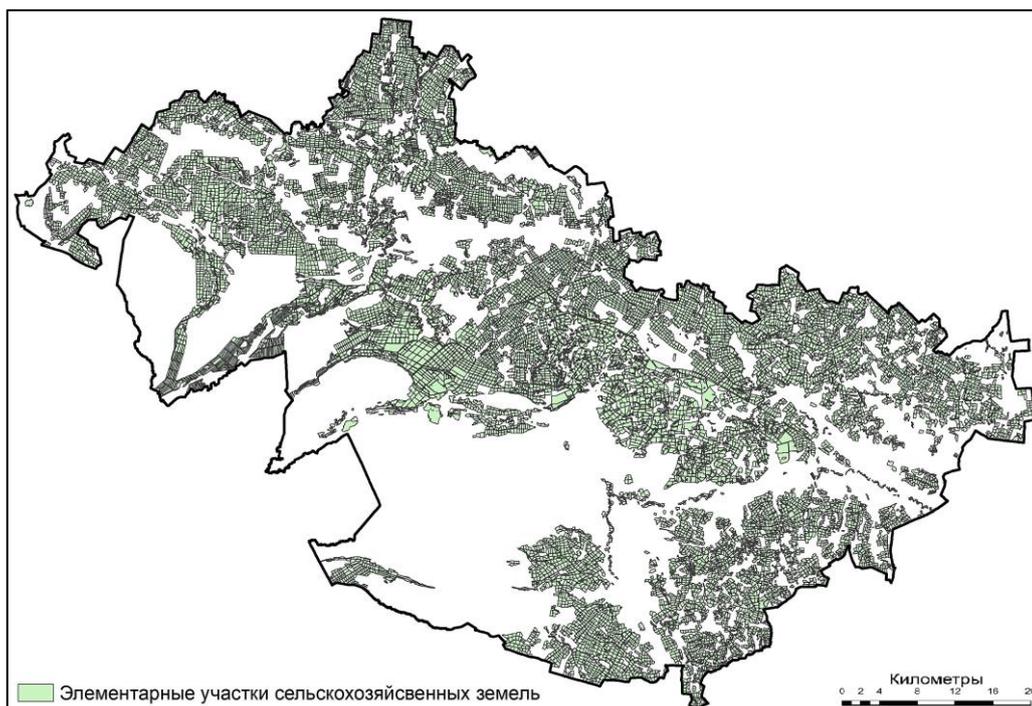


Рис. 1. Структура сельскохозяйственных земель Воложинского района

Fig. 1. Structure of agricultural land in Volozhin district

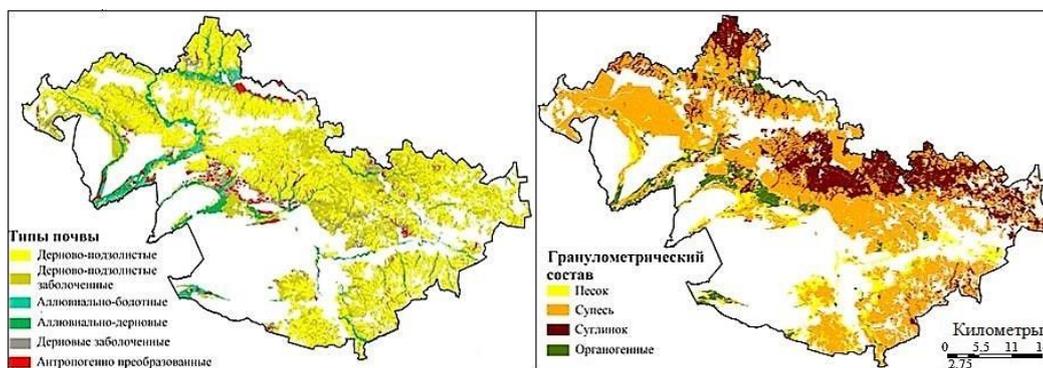


Рис. 2. Карты типов почв и гранулометрического состава сельскохозяйственных земель Воложинского района

Fig. 2. Maps of soil types and granulometric composition of agricultural lands in Volozhin region

Дерново-подзолистые почвы составляют 46% и занимают наибольшую долю от всех типов почв района. Они распределены с северо-западной, северной и восточной частей района, до южной и юго-восточной частей. Дерново-подзолистые заболоченные почвы представлены в северо-западной, центральной и северо-восточной частях Воложинского района и составляют 34% от всех типов почв. Аллювиально-болотные почвы сосредоточены большей своей частью в западной половине и составляют 5% от всех типов почв района. Аллювиально-дерновые почвы располагаются около аллювиально-болотных. Однако в восточной части района они также присутствуют, хоть и в меньшем количестве. Составляют 6% от всех типов почв района. Дерновые заболоченные почвы находятся в северной, центральной и восточной частях Воложинского района. Также, составляют 6% от всех типов почв района.

Антропогенно-преобразованный тип почв встречается в северной, западной и центральной частях района. Занимают наименьшую часть от всех типов почв Воложинского района и составляют 3%. В данный тип почв, согласно номенклатурному списку, приведенному в ТКП 651–2020 (33520)¹, нами относятся деградированные дренированные, деградированные эрозионные, нарушенные, агрогенные и техногенно-заболоченные почвы.

Пески представлены точечно в северо-западной, центральной, юго-восточной и южной частях Воложинского района. Супеси распределены с северо-западной до юго-восточной части Воложинского района. Занимают наибольшую площадь района. Суглинки занимают всю северную часть района, простираясь до его центральной части. Органогенный почвенный покров находится большей своей частью в западной части района. Видна сильная концентрация в центральной и северной частях. Также, небольшая доля находится и в восточной части Воложинского района.

Методы. В исследованиях подобного рода в нашей стране применялись разного вида методы кригинга для получения результирующих поверхностей и их пространственных характеристик [Куцаева, 2020; Мыслыва, 2020], но при этом важным упущением является применение подобных инструментов к площадным объектам – элементарным участкам, на которые делятся поля при агрохимическом обследовании (средние размеры такого участка в РБ варьируют от 3 до 15 га), поскольку при интерполяции такими методами полигоны представляются точечными объектами без учета их площади.

Для реализации подобных методик в ArcGIS ArcMap модулем Geostatistical Analyst предусмотрен инструмент «Площадной интерполяции» (англ. Areal interpolation). Данный инструмент предполагает работу с площадными объектами, содержащими значения с распределением Пуассона, биномиальные значения или значения с распределением Гаусса [Krivoruchko et al., 2011]. Последний вид данных представляет собой усреднённые значения по полигонам, что соответствует элементарным участкам. Использование площадной интерполяции для усреднённых данных обсуждалась еще в 2007 году [Gotway, Young, 2007]. На основе этих исследований площадная интерполяция использовалась при выявлении пространственных закономерностей распространения заболеваний остеоартритом в провинции Альберта, Канада и сопутствующих ему заболеваний [Liu et al., 2020], а также при прогнозировании степени ожирения пятиклассников в школьных округах Лос-Анджелеса [Steeves et al., 2014]. Площадная интерполяция была использована при анализе данных по загрязнению С-137 в населенных пунктах Республики Беларусь, которая показала превосходство выбранного метода по сравнению с обычными видами кригинга [Krivoruchko et al., 2011].

При применении данного инструмента должны быть соблюдены главные требования корректного использования геостатистических методов – исходный набор данных должен содержать минимум 100 точек наблюдений [Oliver et al., 2010; Lark, 2000; Wadoux et al., 2019] и иметь нормальное статистическое распределение. В качестве исходных полигонов нами использованы элементарные участки почвенного обследования сельскохозяйственных земель, содержащие данные о кислотности (рН в KCl), содержании гумуса (%), калия (K₂O) и фосфора (P₂O₅). В Воложинском районе количество полигонов составляет 14428, что соответствует первому правилу.

Проверка на нормальное распределение анализируемых данных выполнялась в Excel 2019, в ходе которой были получены показатели описательной статистики (табл. 1).

¹ Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь. Национальный фонд технических нормативных правовых актов. Электронный ресурс: <https://tnpa.by/#!/DocumentCard/490371/622805> (дата обращения 05.04.2021).

Весь последующий геостатистический анализ – в программном продукте ArcGIS ArcMap с использованием модуля Geostatistic Analyst.

Первым этапом рабочего процесса площадной интерполяции является создание поверхности интерполяции на основе необходимых данных, вторым – прогнозирование значений данных для нового набора полигонов¹.

Вариограммный анализ является ключевым моментом геостатистического оценивания данных. При обычном геостатистическом анализе вариограмма описывает пространственную дисперсию распределения свойств в зависимости от расстояния и определяется следующей формулой:

$$Y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

где z – варьирующая величина;

$z(x_i) - z(x_i + h)$ – результаты измерений в точках x_i и $x_i + h$;

$N(h)$ – количество пар точек, разделенных расстоянием h (которое обычно называется лагом).

Величина $\gamma(h)$ является средней мерой сходства значений признака в точках, разделенных расстоянием h . Таким образом, дисперсия для каждого h рассчитывается как половина среднего квадрата разности значений показателя, измеренных на расстоянии h друг от друга. В случае с площадной интерполяцией уравнение будет представлять собой следующую формулу ковариации описывающую вариограмму-деконволюцию, описаную Cressie [Cressie, 1993]:

$$\text{cov}((Z(A_i), Z(A_j))) = \frac{1}{|A_i||A_j|} \iint_{A_i A_j} \text{cov}(Z(s'), Z(s)) ds ds' \quad (2)$$

$$\text{cov}((Z(A_i), Z(s))) = \frac{1}{|A_i|} \int_{A_i} \text{cov}(Z(s'), Z(s)) ds' \quad (3)$$

где $\text{cov}((Z(A_i), Z(A_j)))$ – ковариация между выполненными измерениями;

A_i и A_j – площади полигонов;

s' и s – значения исследуемых переменных в полигонах.

С помощью этих ковариаций можно делать прогнозы как для полигонов, так и для точек. Среднее расстояние между точками рассчитывалось с помощью инструмента «Среднее ближайшее соседство» (англ. Average Nearest Neighbor).

Целью вариографии является подбор математической модели (вариограммы) к эмпирической вариограмме. Для удобства подбора в площадной интерполяции были добавлены доверительные интервалы, автоматически установленные на основании параметров 1-го и 3-го квартилей. В доверительные интервалы должно попасть 90 и более процентов эмпирической вариограммы, однако на практике данное правило имеет ряд отклонений, что подразумевает оценку вариограммы по показателям среднеквадратического отклонения и средней нормированной ошибки. Основные параметры вариограмм представлены в табл. 2.

После подбора наиболее достоверных вариограмм (рис. 3) и создания интерполяционных моделей следует объединение полученных значений с целевыми полигонами (контура почвенного покрова). Кроме итоговых картограмм (рис. 4) данный

¹ Использование площадной интерполяции для выполнения интерполяций по принципу полигон-к-полигону. ArcGIS Pro. Электронный ресурс: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/using-areal-interpolation-to-predict-to-new-polygons.htm>. (дата обращения 05.04.2021).

инструмент позволяет получить пространственное распределение среднеквадратических ошибок для проверки точности результатов (рис. 5).

Последним этапом выделения зон потенциального плодородия почвенного покрова является объединение полученных картограмм в один составной слой. Инструментарий ArcGIS ArcMap предоставляет несколько вариантов для достижения поставленной задачи, одним из которых является калькулятор растр, который работает с ячейками растра. Инструмент калькулятор растра строит и выполняет выражение алгебры карт с использованием синтаксиса Python в интерфейсе подобном калькулятору.

Для использования алгебры карты полученные векторные слои были конвертированы в растровые модели с разрешением 1 м и были переклассифицированы в шесть зон обеспеченности для каждого отдельного показателя, после чего были объединены в итоговый слой (рис. 6).

Количество зон определялось исходя из числа градаций, установленных методикой крупномасштабных агрохимического и радиологического обследования почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь градаций [Богдевич и др., 2012].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При определении степени отклонения исследуемых данных от нормального Гауссова распределения были получены показатели описательной статистики, представленные в табл. 1.

Табл. 1. Статистическая характеристика почвенных свойств

Table 1. Statistical characteristics of soil properties

Показатели	pH	Гумус	K ₂ O	P ₂ O ₅
Мин	3,72	0,82	15,0	100
Среднее	5,88	2,41	228	195
Макс	7,76	8,58	1560	1689
Медиана	5,92	2,16	200	172
Квартиль 1	5,56	1,86	149	134
Мода	6,50	3,00	300	150
Квартиль 3	6,29	2,84	300	231
Стандартное отклонение	0,55	0,98	119	95,3
Кэф. вариации, %	9,39	40,5	52,1	48,8
Кэф. асимметрии	-0,51	2,46	1,84	3,45
Эксцесс	0,41	7,25	9,20	25,6
Ошибка асимметрии	0,07	0,08	0,07	0,08
Ошибка эксцесса	0,28	0,30	0,28	0,30

На основании значения коэффициента вариации можно сделать вывод, что вариабельность ряда данных «рН» (9,39 %) по шкале степени однородности можно отнести к однородным, однако стоит отметить, что реальную вариабельность содержания ионов Н⁺ данный показатель отражает косвенно, т.к. рассчитывается для прологарифмированных значений, которыми являются значения рН. Сопоставление минимального и максимального значений кислотности говорит о наличии всех классификационных групп показателя, отражая реальную неоднородность рН по территории района. Остальные агрохимические свойства находятся примерно в одной градации – коэффициент вариации принимает значения от 40 до 52 %, что соответствует средней степени неоднородности (30–60%).

Распределение для показателей агрохимических свойств почв района не является симметричным, поскольку значения М, Мо и Ме не равны между собой. Нарушение этих

соотношений свидетельствует о наличии асимметрии распределения. Сопоставляя значения коэффициента асимметрии и эксцесса с их пороговыми значениями, можно констатировать, что у всех свойств наблюдается отклонения от нормального распределения. Значительное превышение эксцесса у гумуса и калия (7,25 и 9,20 соответственно), аномально большое – у фосфора (25,6). Относительно малое отклонение наблюдается у кислотности. Для объективности оценивая нормальности распределения нами были также проанализированы графики «квартиль-квартиль» и гистограммы распределения, сгенерированные в ArcGIS ArcMap. В ходе анализа было обнаружено, что для значений кислотности преобразование не требуется, а после удаления «артефактов» из ряда данных значений калия, распределение также стало приближенным к нормальному. В свою очередь для гумуса и фосфора потребовалось провести логарифмирование.

Анализ математических структур пространственного распределения агрохимических свойств был произведен в программной среде ArcGIS ArcMap. С помощью инструментов Geostatistical Analyst были получены соответствующие вариограммы, представленные на рис. 3, а также их параметры, представленные в табл. 2.

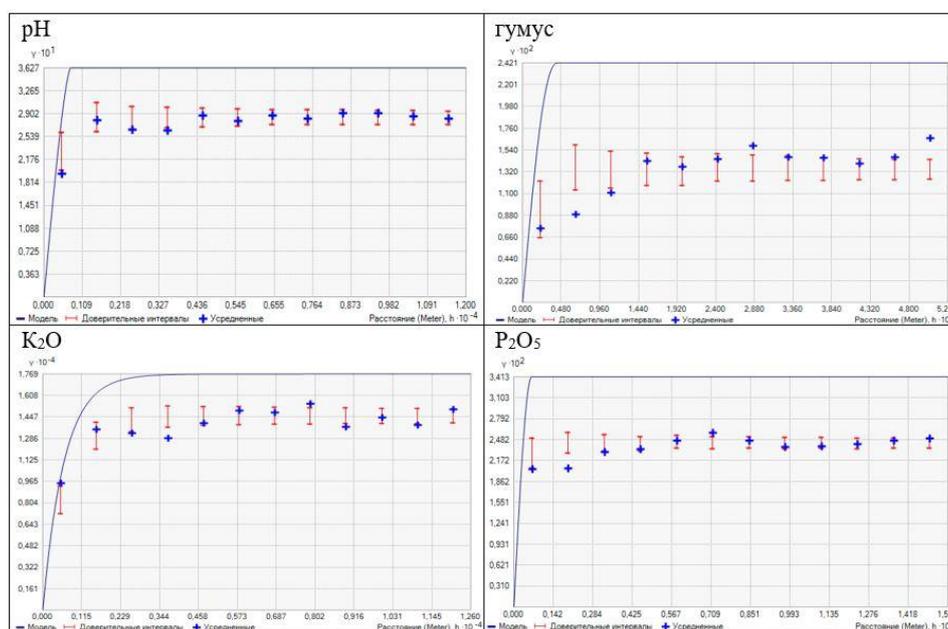


Рис. 3. Вариограммы исследуемых свойств почвенного покрова
 Fig. 3. Variograms of the investigated properties of the soil cover

Эффект самородка у всех представленных вариограмм равняется 0, что позволяет говорить об отсутствии остаточной дисперсии в данных. Эмпирическая вариограмма рН практически идеально ложится в доверительные интервалы, однако наибольшая корреляция наблюдается на средних и дальних расстояниях, в свою очередь, до 2000 м значения имеют более сильную пространственную изменчивость.

Пространственная автокорреляция гумуса лучше всего описывается частным случаем сферической вариограммы – тетрасферической. Ранг вариограммы составил 1528 м, что говорит об отсутствии пространственной связи между значениями на расстояниях, превышающих установленное. Как видно из вариограммы, наибольшим подобием обладают значения на средней дистанции – от 1500 до 4500 метров, а также на малых расстояниях до 400 м.

Калию и фосфору соответствуют экспоненциальная и сферическая вариограммы. У K₂O наблюдаются отклонения на дистанциях от 2000 м до 4500 м, которые затухают после

преодолении этой отметки. Значения фосфора также имеют отклонения от доверительных интервалов на дистанциях до 3000 м.

Табл. 2. Показатели вариограмм исследуемых свойств
Table 2. Indicators of variograms of the investigated properties

Показатели	pH	Гумус	K ₂ O	P ₂ O ₅
Модель	Круговая	Тетрасферическая	Экспоненциальная	Сферическая
Лаг (м)	1000	440	1050	1300
Наггет (C ₀)	0	0	0	0
Порог (C ₀ + C)	0,346	1,116	1,707	0,034
Ранг (м)	982	1528	2330	637
Ост. дисперсия C ₀ /(C ₀ + C), %	0	0	0	0

Лаг у показателей кислотности и содержания калия имеет близкие значения 1000 м и 1050 м соответственно. У фосфора он составляет 1300 м. У содержания гумуса лаг значительно ниже – 440 м. Порог у всех показателей отличается друг от друга, самый высокий у калия – 1,70, самый низкий у фосфора – 0,034. Важным показателем является ранг, отражающий расстояние, на котором точки автокоррелированы между собой. Для кислотности он составляет 982 м, для гумуса – 1528 м, для калия – 2330 м и для фосфора – 637 м.

На основании полученных параметров можно констатировать, что для всех агрохимических свойств наблюдается сильная пространственная зависимость – остаточная дисперсия всех показателей равна 0 %. Это позволяет говорить о правильном подборе моделей вариограмм, которые будут использованы при моделировании для создания картограмм изучаемых свойств.

По результатам работы площадной интерполяции агрохимические свойства были агрегированы в контуры почвенного покрова, значения гумуса и содержания фосфора и их среднеквадратические ошибки интерполяции были возвращены в исходные числа для корректной трактовки результатов. Также были рассчитаны средние значения для преобладающих типов почв в Воложинском районе (табл. 3).

Среднее значение pH практически одинаково у всех типов почв и колеблется от 5,78 у аллювиально-дерновых почв до 5,91 у антропогенно-преобразованных почв. Все типы почв являются слабокислыми. На региональном уровне это говорит о качественно проведенном известковании почв, так как значение pH находится в оптимальном диапазоне для возделывания основных сельскохозяйственных культур в исследуемом районе.

Табл. 3. Средние агрохимические показатели для типов почв Воложинского района
Table 3. Content of agrochemical elements in soil types of Volozhin region

Тип почвы	Показатели			
	pH	Гумус, %	K ₂ O, мг/кг почвы	P ₂ O ₅ , мг/кг почвы
Дерново-подзолистая	5,88	2,15	226	184
Дерново-подзолистая заболоченная	5,85	2,36	210	195
Аллювиально-дерновая	5,78	2,95	178	170
Дерновая заболоченная	5,87	3,00	199	181
Антропогенно-преобразованная	5,91	3,17	223	172

Значение для гумуса колеблется от 2,15 % у дерново-подзолистых почв до 3,19 %. Содержание гумуса является повышенным у дерново-подзолистых (2,15 %) и дерново-подзолистых заболоченных (2,36 %) почв. Высокое содержание гумуса у аллювиально-дерновых почв (2,95 %). Для всех остальных типов почв характерно очень высокое содержание гумуса (свыше 3 %).

Максимальное значение для P_2O_5 составляет 195 мг/кг почвы у дерново-подзолистых заболоченных почв. Минимальное значение составляет 171 мг/кг почвы у аллювиально-дерновых почв. Для минеральных почв колебание содержания фосфора в границах 171–195 мг/кг является повышенным.

Значение K_2O колеблется от 178 мг/кг почвы у аллювиально-дерновых почв до 226 мг/кг почвы у дерново-подзолистых почв. Формально можно выделить почвы со средним содержанием калия: аллювиально-дерновые (178 мг/кг почвы) и дерново-заболоченные (199 мг/кг почвы); а также почвы с повышенным содержанием: дерново-подзолистые заболоченные (210 мг/кг почвы, антропогенно-преобразованные (224 мг/кг почвы) и дерново-подзолистые (226 мг/кг почвы).

При анализе средних показателей по типам почв вырисовывается картина относительной однородности почвенного покрова, однако, при пространственной визуализации на рис. 4 можно проследить многообразие почвенных контуров, представленных на территории исследуемого района.

Анализируя картограмму кислотности почв, можно заметить, что значение рН от 6,5 и выше наиболее характерно для дерново-подзолистых и дерновых заболоченных почв в центральной и восточной частях района. Такие уровни кислотности единично встречаются и на антропогенно-преобразованных почвах в центральной части Воложинского района. Слабокислые и близкие к нейтральным занимают наибольшую долю от всех типов почв района. Они распространены повсеместно, за исключением юго-восточной части района. Им также соответствуют преимущественно дерново-подзолистые и дерновые заболоченные почвы. Слабокислым почвам соответствуют в особенности аллювиальные почвы, характерные для западной части района. Странным является наличие повышенного количества кислых почв в центральных и юго-восточных частях, тяготеющим к районному центру, тогда как обычно они тяготеют к периферии.

Очень высокое содержание гумуса в почвенном покрове района (более 3 %) приурочено к антропогенно-преобразованным и аллювиально-дерновым типам почв в северной, западной и центральной частях Воложинского района. Повышенное (от 2,01%) содержание гумуса наблюдается в северо-западной, северной, северо-восточной и центральной частях района, чаще соответствует дерново-подзолистым и дерново-подзолистым заболоченным типам почв. Низкие и средние показатели содержания гумуса (до 2%) также приурочены к дерново-подзолистым и дерново-подзолистым заболоченным типам почв. Они сосредоточены в восточной и юго-восточной частях района. Наибольшее содержание гумуса обычно наблюдается у почв с кислотностью близкой к нейтральной и нейтральной.

По содержанию P_2O_5 почвы Воложинского района можно отнести к хорошо обеспеченным. Почвы с содержанием менее 100 мг/кг практически отсутствуют, занимая отдельные почвенные ареалы, рассредоточенные по всей территории района. Высокое содержание наблюдается у дерново-подзолистых и антропогенно-преобразованных почв.

Практически вся территория имеет оптимальные значения содержания фосфора – 250–300 мг/кг для супесчаных и 300–350 мг/кг для суглинистых почв [Богдевич и др., 2012].

По содержанию калия Воложинский район четко разделяется на северную и южную части. Высокое и очень высокое содержание K_2O в почвенном покрове ярко выражено в северной и центральной частях района. Высокие значения (от 300 мг/кг почвы) соответствуют дерново-подзолистым и дерново-подзолистым заболоченным почвам. Средние значения K_2O и ниже наблюдаются в центральной и юго-восточной частях территории.

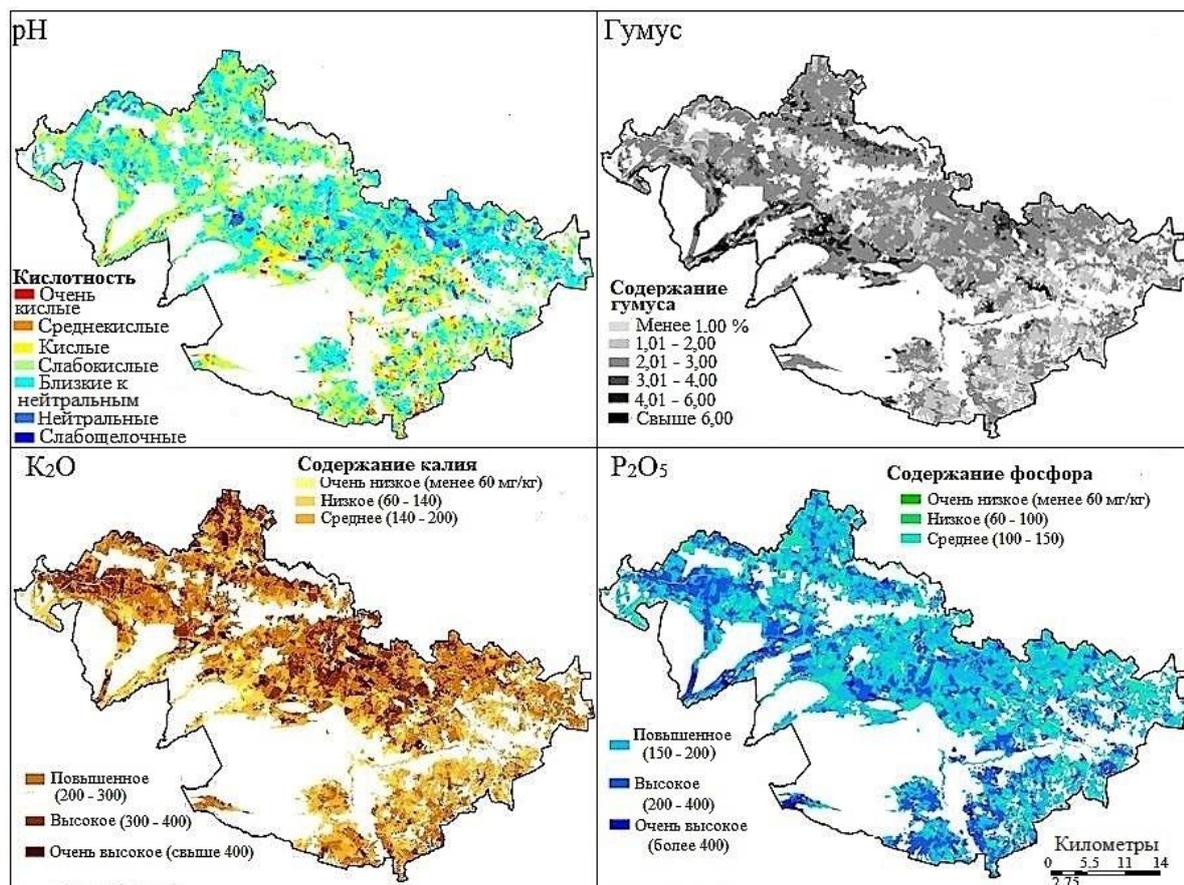


Рис. 4. Картограммы агрохимических свойств почвенного покрова Воложинского района
 Fig. 4. Cartograms of the agrochemical properties of the soil cover of the Volozhin region

Наивысшая среднеквадратическая ошибка интерполяции по величине рН привязана к слабокислым почвам и распространяется с севера-западной до юго-восточной части района. В целом, отклонения значений находится в диапазоне до 0,15 единиц, что говорит о высокой достоверности полученной картограммы.

Ошибка проинтерполированных значений гумуса от исходных данных присуща антропогенно-преобразованным почвам с повышенным содержанием гумуса от 2,01% до 3,00%.

Среднеквадратическую ошибку значений фосфора можно оценить как незначительную. Большая часть картограммы имеет отклонение в 5,00 кг/га, а максимальные – не превышают диапазоны установленных градаций данного показателя при агрохимических обследованиях.

Проинтерполированные значения К₂О имеют значительный диапазон среднеквадратической ошибки, в единичных случаях он достигает 120 мг/га в центральной и в восточной частях района. что уже превышает установленные диапазоны градации [Богдевич и др., 2012] и говорит о высокой степени недостоверности результатов в этих частях картограммы.

Однако, для большей части района ошибка незначительна (менее 40 мг/га) и находятся в пределах доверительных интервалов.

В целом, можно говорить о том, что все картограммы в достаточной мере отражают реальную картину распределения агрохимических свойств и могут служить основой для выделения зон разного потенциального плодородия почвенного покрова (рис. 6). Градация выделенных зон представлена в табл. 4

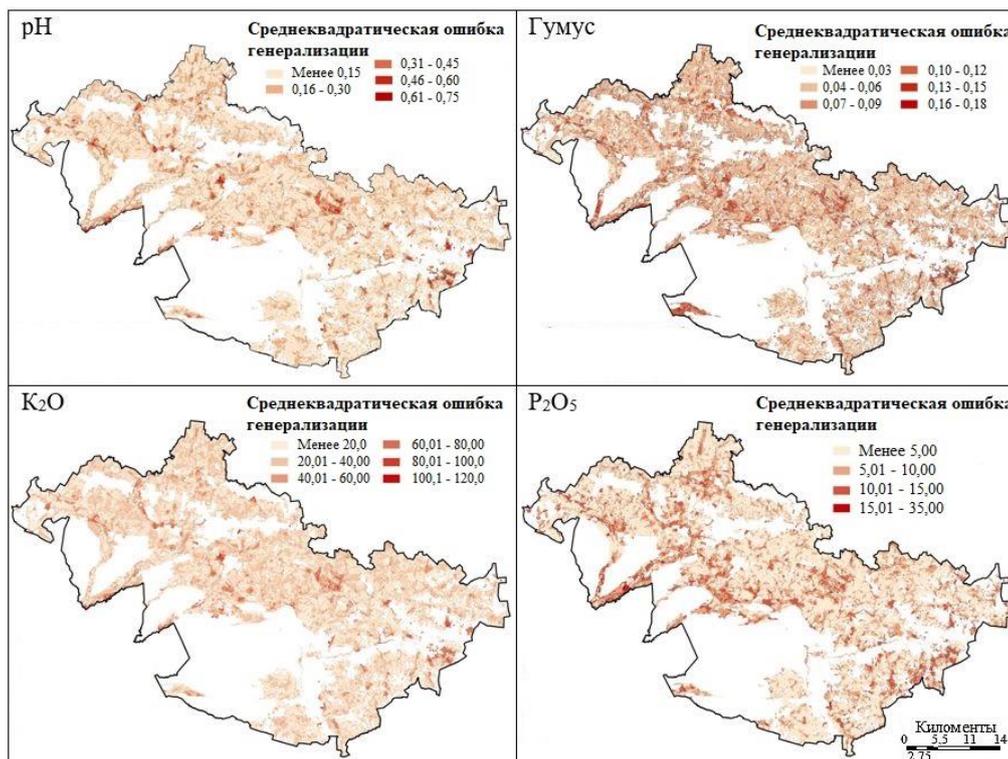


Рис. 5. Картограммы среднеквадратических ошибок интерполяции агрохимических свойств Воложинского района

Fig. 5. Cartograms of mean square errors of interpolation of agrochemical properties of Volozhin region

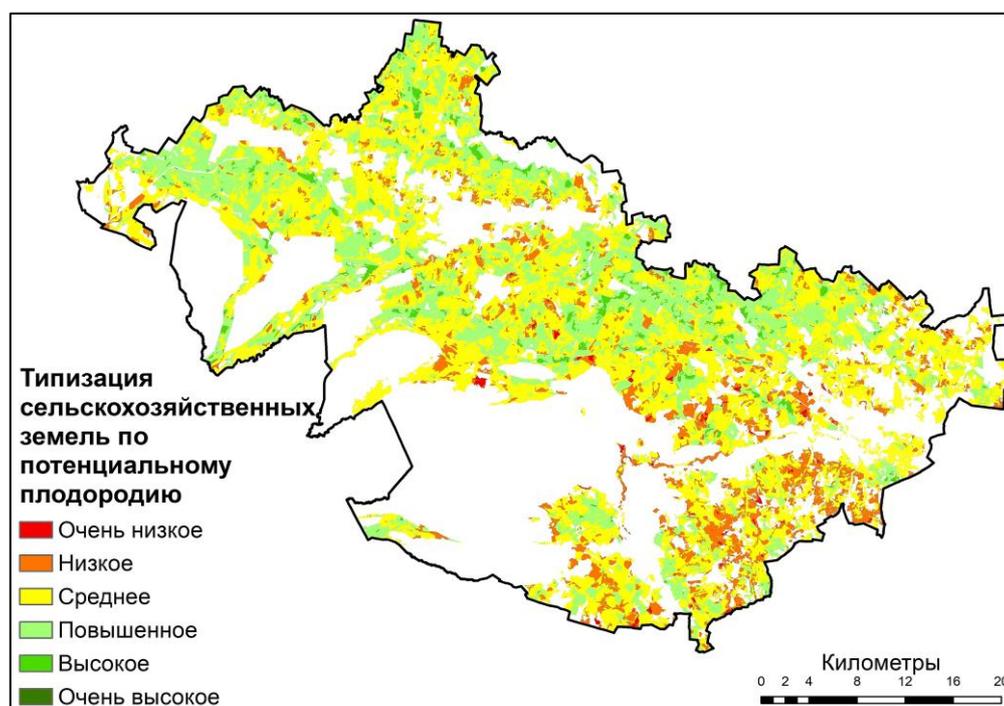


Рис. 6. Потенциальное плодородие почвенного покрова сельскохозяйственных земель Воложинского района

Fig. 6. The productive capacity of the soil cover of agricultural lands of the Volozhin region

Табл. 4. Типизация сельскохозяйственных земель по потенциальному плодородию
 Table 4. Typification of agricultural land by potential fertility

Показатель	Гумус, %	pH	Фосфор, мг/кг	Калий, мг/кг
С очень низким потенциальным плодородием	менее 1,00	менее 4,5	менее 60	менее 60
С низким потенциальным плодородием	1,01–2,00	4,5–5,0	60–100	60–140
Со средним потенциальным плодородием	2,01–3,00	5,0–5,5	100–150	140–200
С повышенным потенциальным плодородием	3,01–4,00	5,5–6,0	150–200	200–300
С высоким потенциальным плодородием	4,01–6,00	6,0–6,5	200–400	300–400
С очень высоким потенциальным плодородием	свыше 6,00	свыше 6,5	свыше 400	свыше 400

Потенциальное плодородие, или производительная способность почв во многом определяется гранулометрическим составом почвы, так как от него зависят физические свойства и водный, воздушный, тепловой и пищевой режимы почвы. Лёгкие песчаные и супесчаные почвы являются «тёплыми», они имеют высокую водопроницаемость и хорошую аэрацию, но малую влагоёмкость, низкую поглощательную способность и буферность. Лучшими для большинства растений являются суглинистые почвы. Сопоставляя полученную карту с географическим распределением почв по гранулометрическому составу, можно выделить ряд закономерностей, которые, в свою очередь, дают основание говорить об определённой степени достоверности полученных результатов.

Почвы с низким потенциальным плодородием наблюдаются в юго-восточной части района, они приурочены к пескам и супесям. В восточной части района отрицательно на потенциальном плодородии почв сказались расчленённость рельефа и влияние эрозии. Из-за плоскостного смыва качество земель и производительная способность здесь ниже.

Высокая производительность почв по агрохимическим показателям характерна для равнинных территорий в долинах рек, а также для северо-западной и северной части района. Почвы с высоким уровнем плодородия соответствуют обычно суглинкам с содержанием гумуса до 4% и выше, показателем обменной кислотности от 6,0 и выше, содержание фосфора и калия до 400 и более мг на кг почвы.

В целом с помощью геостатистических методов можно достаточно корректно интерполировать показатели агрохимических свойств на довольно большие территории и выявлять территориальные особенности.

ВЫВОДЫ

Обобщив вышесказанное, можно констатировать, что методика выделения зон потенциального плодородия (менеджмент-зон, зон управления) по агрохимическим свойствам требует использования площадной интерполяции. Именно этот метод дает возможность учитывать не только значения показателя, но и площадь элементарных участков. Вместе с тем, картограммы среднеквадратических ошибок дают исчерпывающую картину качества проведённой интерполяции исходного набора картограмм.

Отличительной чертой вариографии, при данном способе интерполяции, является не сопоставление эмпирической модели с математической, а как можно более полное попадание в доверительные интервалы квартилей. Также стоит отметить один из минусов инструментария площадной интерполяции в ArcGIS ArcMap – отсутствие автоматизи-

рованного преобразования данных, что требует от исследователя реализовывать данную процедуру в ручном режиме (в нашем случае – логарифмирование), а затем переводить значения в их исходный вид.

По полученным результатам можно говорить о высокой степени достоверности карты потенциального плодородия. Зоны с высокими значениями тяготеют к равнинным территориям и к более тяжелым почвам, в свою очередь, низкая продуктивность характерна для территорий с лёгким гранулометрическим составом и к территориям с расчлѐнным рельефом, где качество земель ухудшается из-за плоскостного смыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богдевич И.М.* Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь: методические указания. Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2012. 48 с.
2. *Клебанович Н.В.* Разработать геоинформационную базу пространственных информационно-аналитических данных, отражающих устойчивость различных типов земель агроландшафтов к техногенному воздействию: отчет о НИР (заключ.). Минск. Ин-т почвоведения и агрохимии. 2019.
3. *Куцаева О.А.* Создание менеджмент-зон для дифференцированного внесения минеральных удобрений с использованием инструментов геостатистики. Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, 2020. №2. С. 176–181.
4. *Мыслыва Т.Н.* Использование геостатистических инструментов для оценки пространственного распределения кислоторастворимой меди в почве. Вестник белорусской государственной сельскохозяйственной академии, 2020. № 2. С. 170–176.
5. *Червань А.Н., Цырибко, В.Б., Устинова, А.М.* Данные агрофизических свойств почв в формировании почвозащитных систем земледелия с применением гис-технологий на примере Браславского района Витебской области. Минск, Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси, 2016. С. 25–36.
6. *Черныш А.Ф.* Проектирование противоэрозионных комплексов и использование эрозионноопасных земель в разных ландшафтных зонах Беларуси. Минск, Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси, 2005. 52 с.
7. *Cressie N.A.C.* Statistics for Spatial Data. Revised ed. John Wiley & Sons. New York, 1993. 900 p.
8. *Gotway C.A., Young L.J.* A geostatistical approach to linking geographically aggregated data from different sources. Journal of Computational and Graphical Statistics, 2007. V. 16. P. 115–135
9. *Krivoruchko K., Gribov A., Krause, E.* Multivariate Areal Interpolation for Continuous and Count Data. Procedia Environmental Sciences 3, 2011. P. 14–19.
10. *Lark, R.M.* Estimating variograms of soil properties by the method-of-moments and maximum likelihood. European Journal of Soil Science, 2000. V. 51. P. 717–728.
11. *Liu X., Shahid R., Patel A.B., Terrence McDonald T., Bertazzon S., Waters N, Judy E. Seidel J.E., Marshall D.A.* Geospatial patterns of comorbidity prevalence among people with osteoarthritis in Alberta Canada. BMC Part of Springer Nature. 2020. 16 p. Web resource: <https://bmcpublihealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12889-020-09599-0> (accessed 05.04.2021)
12. *Oliver, V.A., Kerry, R., Frogbrook, Z.L.* Sampling in Precision Agriculture. Geostatistical Applications for Precision Agriculture, Springer Science+Business Media B.V., 2010. P. 35–64.
13. *Steeves, E.A. Martins, P.A., Gittelsohn, J.* Changing the Food Environment for Obesity Prevention: Key Gaps and Future Directions. Curr Obes Rep., 2014. V. 3(4). P. 451–458.

14. *Wadoux, A. M.J.-C., Marchant, B.P. Lark, R. M.* Efficient sampling for geostatistical surveys. *The European Journal of Soil Science*, 2019. 9 p.

REFERENCES

1. *Bogdevich I.M.* Large-scale agrochemical and radiological examination of soils of agricultural lands of the Republic of Belarus: methodological instructions. Minsk: Institute of Soil Science and Agrochemistry, 2012. 48 p. (in Russian)
2. *Chernysh A.F.* Design of anti-erosion complexes and the use of erosion-hazardous lands in different landscape zones of Belarus. Minsk, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, 2005. 52 p. (in Russian).
3. *Chervan A.N. Tsyribko V.B., Ustinova A.M.* Data of agrophysical properties of soils in the formation of soil-protective systems of agriculture using GIS-technologies on the example of the Braslavsky district of the Vitebsk region. Minsk, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, 2016. P. 25–36 (in Russian).
4. *Cressie, N.A.C.* *Statistics for Spatial Data*. Revised ed. John Wiley & Sons. New York, 1993. 900 p.
5. *Gotway C.A, Young L.J.* A geostatistical approach to linking geographically aggregated data from different sources. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 2007. V. 16. P. 115–135.
6. *Klebanovich N.V.* To develop a geoinformation base of spatial information and analytical data, reflecting the resistance of various types of land in agricultural landscapes to anthropogenic impact: research report (conclusion). Minsk. Institute of Soil Science and Agricultural Chemistry, 2019 (in Russian).
7. *Krivoruchko K., Gribov A., Krause E.* Multivariate Areal Interpolation for Continuous and Count Data. *Procedia Environmental Sciences* 3, 2011. P. 14–19.
8. *Kutsaeva O.A.* Creation of management zones for the differentiated application of mineral fertilizers using geostatistical tools. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*, 2020. No 2. P. 176–181 (in Russian).
9. *Lark R.M.* Estimating variograms of soil properties by the method-of-moments and maximum likelihood. *European Journal of Soil Science*, 2000. V. 51. P. 717–728.
10. *Liu X., Shahid R., Patel A.B., Terrence McDonald T., Bertazzon S., Waters N, Judy E. Seidel J.E., Marshall D.A.* Geospatial patterns of comorbidity prevalence among people with osteoarthritis in Alberta Canada. *BMC Part of Springer Nature*. 2020. 16 p. Web resource: <https://bmcpublichealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12889-020-09599-0> (accessed 05.04.2021)
11. *Oliver V.A., Kerry R., Frogbrook Z.L.* *Sampling in Precision Agriculture. Geostatistical Applications for Precision Agriculture*, Springer Science + Business Media B.V., 2010. P. 35–64.
12. *Steeves E.A. Martins P.A., Gittelsohn J.* Changing the Food Environment for Obesity Prevention: Key Gaps and Future Directions. *Curr Obes Rep.*, 2014. V. 3 (4). P. 451–458.
13. *Thoughts, T.N.* Using geostatistical tools to assess the spatial distribution of acid-soluble copper in soil. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*, 2020. No 2. P. 170–176.
14. *Wadoux A.M. J.-C., Marchant B.P. Lark R.M.* Efficient sampling for geostatistical surveys. *The European Journal of Soil Science*, 2019. 9 p.