

АГРОНОМИЯ

DOI: 10.31677/2072-6724-2024-72-3-5-12

УДК: 631.471

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ПОЛЕВОГО ОПЫТА С МИНЕРАЛЬНЫМИ УДОБРЕНИЯМИ

Е.Н. Белоусова, кандидат биологических наук, доцент

А.А. Белоусов, кандидат биологических наук, доцент

О.А. Ульянова, доктор биологических наук, профессор

Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

E-mail: svoboda57130@mail.ru

Ключевые слова: полевой опыт, варьирование, неоднородность, геостатистика, автокорреляционная функция, элементы методики полевого опыта.

Реферат. Цель работы – исследовать статистические параметры и закономерности изменчивости агрохимических показателей агросерой почвы, элементов структуры урожая яровой пшеницы в пределах делянок опытного поля. Экспериментальные данные получены на основе наблюдений, проведенных на агроландшафтах «Сухобузимское» в Красноярской лесостепи Красноярского геоморфологического округа, расположенного в границах Чулым-Енисейского денудационного плато юго-западной окраины Средней Сибири. Представлены результаты внутривидовой неоднородности агрохимических свойств агросерой почвы и элементов структуры урожая яровой пшеницы на участке, предназначенном для полевого эксперимента. Определены ключевые статистические и геостатистические величины внутривидовой неоднородности. Анализируется вариабельность агрохимических показателей, результаты данных об урожае и элементов его структуры с участков, предназначенных для размещения повторностей. Уровень изменчивости агрохимических показателей убывал в следующем ряду: урожайность (40 %) > гумус (19 %) > P_2O_5 (13 %) > K_2O (10 %) > pH_2O (4 %). Согласно обобщению геостатистической информации, анализируемый участок классифицируется как не выровненный с точки зрения плодородия почв. В целом плодородие почв на исследуемой территории имело значительные колебания, что определило выбор элементов методологии проведения полевых опытов. При планировании полевого опыта необходимо выбрать соответствующие элементы методологии: рандомизированный метод размещения повторений, прямоугольные или удлиненные формы делянок.

ASSESSMENT OF SPATIAL VARIABILITY OF AGROCHEMICAL PROPERTIES OF AGRO-GRAY SOIL WHEN PLANNING A FIELD EXPERIMENT WITH MINERAL FERTILIZERS

E.N. Belousova, PhD of Biological Sciences, Associate Professor

A.A. Belousov, PhD in Biological Sciences, Associate Professor

O.A. Ulyanova, Doctor of Biological Sciences, professor

Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: svoboda57130@mail.ru

Keywords: field experience, variation, heterogeneity, geostatistics, autocorrelation function, elements of field experience methodology.

Abstract. The purpose of the work is to investigate the statistical parameters and patterns of variability of agrochemical indicators of agro-gray soil, elements of the structure of the spring wheat crop within the plots of the experimental field. Experimental data were obtained on the basis of observations conducted on agricultural landscapes Sukhobuzimskoye land areas in the Krasnoyarsk forest-steppe of the Krasnoyarsk geomorphological district, located borders the Chulym-Yenisei denudation plateau in the southwestern outskirts of Central Siberia. The results of the intra-field heterogeneity of the agrochemical properties of the agro-gray soil and the elements of the structure of the spring wheat crop on the site intended for field experiment are presented. The key statistical

and geostatistical values of the intrafield heterogeneity are determined. The statistics of agrochemical indicators and the results of crop data from the plots intended for the placement of repetitions are analyzed. The materials of the agrochemical survey of the agro-gray soil revealed a low humus content. The level of spatial variation of the indicator corresponded to the average. The scope of variation is represented by values covering only one gradation of the evaluation scale. The entire studied area was characterized by a slightly acidic reaction of the medium according to the average pH values. Its variation in the 0-20 cm soil layer indicated uniformity of distribution in space. The level of variability of agrochemical indicators decreased in the following series: yield (40 %) > humus (19 %) > P₂O₅ (13 %) > K₂O (10 %) > pH₂O (4 %). According to the generalization of geostatistical information, the analyzed site is classified as unaligned in terms of soil fertility. In general, the soil fertility of the studied area had a significant variation, which determined the choice of elements of the field experience methodology. When laying out field experience, it is necessary to choose the appropriate elements of the methodology: a randomized method of placing repetitions, rectangular or elongated forms of plots.

Пространственная и временная динамика почвенных процессов и свойств является неотъемлемым атрибутом почвы как объекта исследования и потому часто затрудняет выявление изучаемых фактов и закономерностей [1–4]. Важным элементом методики проведения полевых опытов с удобрениями является учет внутрипольной вариабельности показателей, характеризующих неоднородность почвенного покрова. Пространственное варьирование агрохимических показателей почв обусловлено неоднородностью морфогенетических свойств почвы и неравномерностью внесения удобрений. Варьирование содержания элементов в почве опытного участка может оказывать влияние на данные урожайности и химического состава растений, получаемых в ходе полевого эксперимента [5–8]. В условиях земледельческой зоны Красноярского края подобные исследования актуальны в связи с существенным распространением микропестроты почвенного покрова [9]. В свою очередь, неоднородность растительного покрова коррелирует с флуктуациями состава и свойств почвы, что предопределяет провинциальные особенности почв региона.

Критериями для оценки неоднородности агрохимических параметров почвы и параметров урожая являются показатели изменчивости вариационной статистики. В общепринятой методологии экспериментальных работ отсутствуют количественные критерии, по которым можно было бы оценить степень выравнивания (однородности) участка по тому или иному агрохимическому показателю [10]. В связи с потребностью изучения внутрипольной неоднородности возникает вопрос выбора наиболее диагностически чувствительных показателей, при помощи которых можно оценить уровень

изменчивости. При управлении продукционным процессом растений (технологии «точного земледелия») и изучении влияния каких-либо факторов на урожай сельскохозяйственных культур в полевых опытах важная роль принадлежит установлению причинно-следственных связей: варьирование почвенных свойств – варьирование величины урожая [1, 11–12].

Цель исследований – оценить статистические параметры и закономерности изменчивости агрохимических показателей агросерой почвы, элементов структуры урожая яровой пшеницы в пределах делянок опытного поля, предназначенного для проведения экспериментов с минеральными удобрениями.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сопряженные наблюдения осуществлялись в агроландшафтах «Сухобузимское» в Красноярской лесостепи Красноярского геоморфологического округа, расположенного в границах Чулымо-Енисейского денудационного плато юго-западной окраины Средней Сибири. Географические координаты полевого стационара – 56°26' с.ш. и 92°54' в.д.

Объект исследований – почва агросерая среднегумусная среднеческая легкоглинистая на карбонатных песчанисто-иловатых легких глинах. В условиях полевого стационара организованы опытные блоки прямоугольной формы с учетной площадью 0,33 га. Для исследования пространственного варьирования земельного участка, где предполагалась организация полевых наблюдений, применяли метод, предполагающий рекогносцировку местности. Для этого высевали яровую пшеницу (*Triticum aestivum* L.) и отбирали почвенные образцы

из слоя 0–20 см. Объем выборки составил 28 индивидуальных проб. Регистрацию комплексности почвенного покрова проводили на всей территории земельного массива по фиксированной сетке площадок размером 6 × 20 м. Учет

урожая проводили метровками. Отобранные снопы яровой пшеницы обмолачивали, определяли элементы структуры урожая. Основные химические и физико-химические параметры почвы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели химических и физико-химических свойств агросерой почвы
Indicators of chemical and physicochemical properties of agro-gray soil

Глубина, см	Гумус, %	pH _{H2O}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S	H _r	ЕКО	V, %	Содержание фракций, %	
			ммоль /100 г						<0,01	<0,001
0–20	3,89	6,4	26,2	5,1	31,3	2,5	33,8	92,6	64,1	39,4

Исследования проводили исходя из представлений об объективно существующих уровнях неоднородности почв и их свойств [8], использовались методические подходы к изучению сильно варьирующих свойств почв на близких расстояниях [12]. Агрохимические свойства и гранулометрический состав изучен при помощи методов и рекомендаций [13]. Для всех данных рассчитаны основные статистические характеристики при помощи программ Excel и автокорреляционные функции с использованием программы Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследования почвенных проб и рекогносцировочных посевов яровой пшеницы рассчитаны основные вариационно-статистические параметры пространственного варьирования, характеризующие неоднородность изучаемого почвенного покрова агросерой почвы. Результаты наблюдений выявили, что агросерая почва характеризовалась низким содержанием гумуса (табл. 2).

Таблица 2

Статистические показатели агрохимических свойств агросерой почвы (n = 28)
Statistical indicators of agrochemical properties of agro-gray soil (n = 28)

Показатель	x	lim	S _x	V, %
pH _{H2O}	6,2	5,8–6,9	0,04	4
Гумус, %	3,8	2,5–5,2	0,14	19
P ₂ O ₅ , мг/кг	77,0	53,1–94,0	1,9	13
K ₂ O, мг/кг	236,6	184,0–292,0	4,6	10
Урожайность яровой пшеницы, ц/га	41,0	21,0–94,0	3,2	40

* x – среднее, lim – крайние значения элементов выборки в вариационном ряду, S_x – ошибка средней, V – коэффициент вариации.

Уровень внутривариационной изменчивости показателя соответствовал среднему. Его лаг представлен значениями, рассеянными в пределах одной градации оценочной шкалы. Почва стационара по средним значениям pH характеризовалась слабокислой реакцией среды. Ее варьирование в слое почвы от 0 до 20 см указывало на однородность распределения в пространстве. Значительнее изменялась пространственная неоднородность почвы по содержанию подвижных форм фосфора и калия.

Количество легкорастворимых соединений фосфора в среднем составило 77,0 мг/кг почвы и оценивалось как низкое со средним уровнем варьирования показателя. С точки зрения методики полевого опыта с минеральными удобрениями отмеченная информация указывает на целесообразность ее учета при выборе способа размещения делянок на стационаре. Исследуемая агросерая почва характеризовалась средней обеспеченностью подвижным калием. Его распределение в пространстве более равно-

мерно, чем подвижного фосфора, однако также соответствовало средней степени варьирования. В целом по убыванию уровня варибельности показатели ранжировались в следующий ряд: урожайность (40 %) > гумус (19 %) > P₂O₅ (13 %) > K₂O (10 %) > рН_{H2O} (4 %).

Результаты исследований по структуре урожая яровой пшеницы, представленные в табл. 3,

свидетельствовали о значительной варибельности таких показателей, как кустистость общая и продуктивная, озерненность колоса, масса 1000 зерен. Слабее изменялась пространственная неоднородность таких элементов структуры урожая культуры, как длина растений и колоса.

Таблица 3

Статистические показатели структуры урожая пшеницы (n = 28)
Statistical indicators of the structure of wheat crop (n = 28)

Показатель	n	x	lim	S _x	V, %
Кустистость общая	1	1,6	1,1–2,3	0,2	28
	2	1,3	1,0–1,8	0,1	23
	3	1,7	1,4–2,5	0,1	22
	4	1,3	1,1–1,6	0,1	12
Кустистость продуктивная	1	1,1	1,0–1,5	0,1	17
	2	1,0	1,0–1,2	0,1	7
	3	1,5	1,0–2,4	0,1	30
	4	1,2	1,0–1,6	0,1	15
Длина растений, см	1	112	105–118	1,7	4
	2	110	104–118	2,0	5
	3	107	94–115	2,8	7
	4	103	91–108	2,3	6
Длина колоса, см	1	6,8	5,4–7,5	0,3	11
	2	6,1	5,5–7,2	0,2	11
	3	6,1	4,7–7,1	0,3	14
	4	6,2	4,8–7,1	0,3	13
Озерненность колоса	1	17,0	12,1–23,8	1,8	28
	2	21,3	14,3–27,2	1,6	20
	3	19,3	12,5–26,0	2,0	27
	4	15,7	11,1–21,4	1,2	20
Масса 1000 зерен, г	1	69,6	41,0–102,5	8,6	33
	2	66,6	46,5–94,0	6,1	24
	3	61,6	47,8–70,7	3,4	14
	4	64,2	61,0–68,0	1,0	4

Следствием неоднородности агрохимических показателей агросерой почвы исследуемого участка является варибельность элементов структуры урожайности яровой пшеницы. Между свойствами почвы и растущей на ней растительностью в силу взаимовлияния разнонаправленного действия факторов складываются трудно диагностируемые взаимоотношения [6]. Нашими исследованиями установлено, что

средняя урожайность яровой пшеницы составила 41 ц/га. Диапазон варьирования колебался от 21 до 94 ц/га, обуславливая высокие значения коэффициента вариации и допустимые значения точности – 6 %. Представленные данные важны, прежде всего, для оценки степени внутривариационной вариации почвенного плодородия. Как известно, на их основе делаются ключевые предположения о выборе элементов методики

[1]. Одним из них являются используемые в полевом опыте повторения (блоки). Нами были проанализированы статистики агрохимических

показателей и результаты урожайных данных с участков, предполагаемых для размещения повторений (табл. 4).

Таблица 4

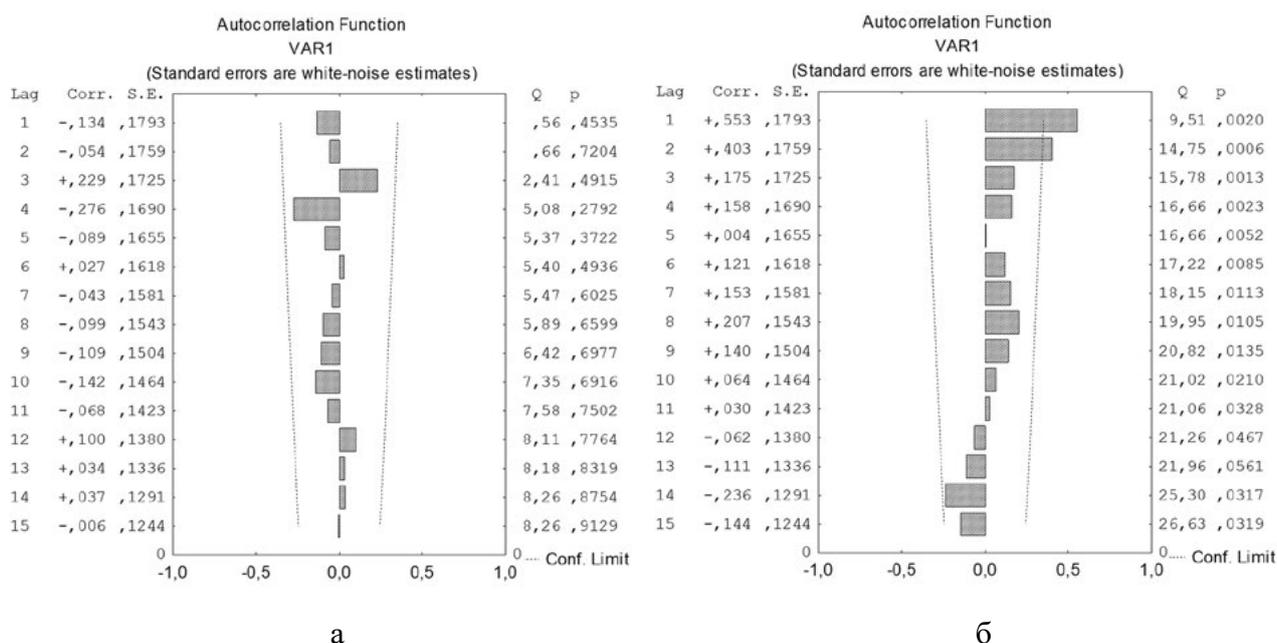
Достоверность различий агрохимических показателей и данных рекогносцировочных посевов между повторениями (n = 7)

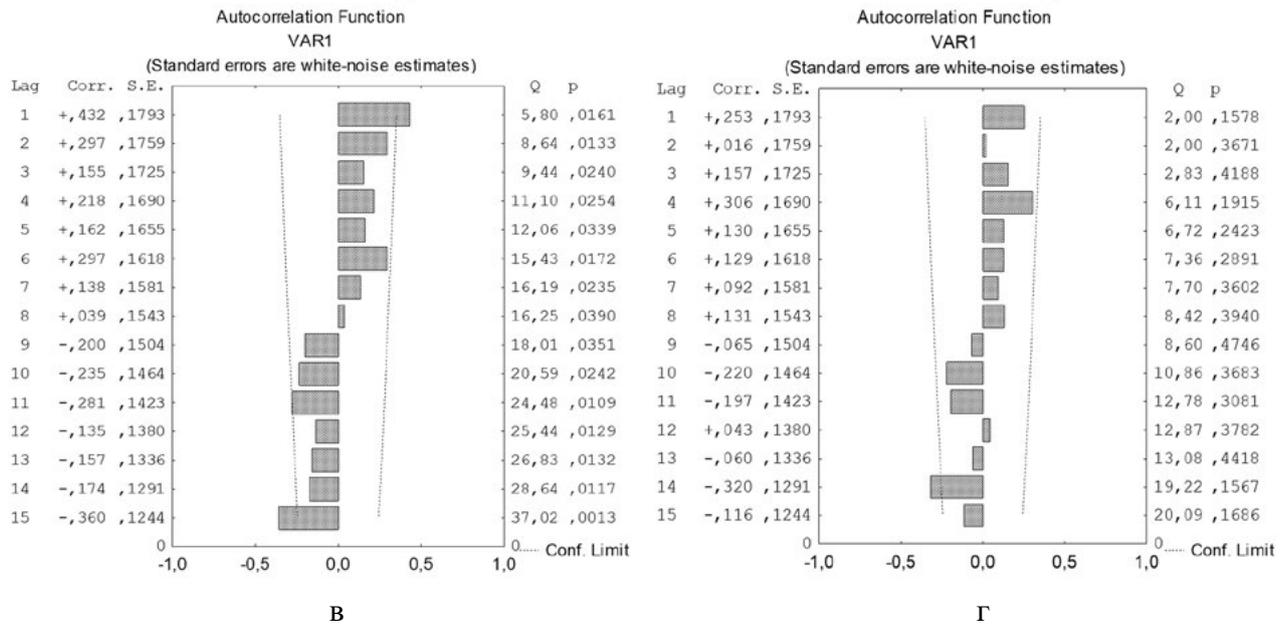
Reliability of differences in agrochemical parameters and reconnaissance crop data between replicates (n = 7)

Повторение	Урожайность, ц/га	Гумус, %	Подвижный фосфор, мг/кг	Подвижный калий, мг/кг	pH
1	31	4,6	87	217	6,2
2	51	3,9	78	232	6,0
3	37	3,5	68	257	6,2
4	45	3,4	74	241	6,2
НСР ₀₅	p > 0,05	0,6	8	24	p > 0,05

Результаты показали, что выявленное значительное варьирование урожайных данных яровой пшеницы, вероятно, было обусловлено изменчивостью внутри блоков (повторений). По содержанию гумуса, подвижного фосфора и калия сравниваемые повторения отличались статистически достоверно. Вероятно, варьирование на больших расстояниях (между блоками) оказалось более значимым относительно внутри пространственной изменчивости (внутри блоков). Также не было выявлено корреляционной зависимости между продуктивностью яровой пшеницы и агрохимическими свойствами почвы.

Для увеличения точности пространственно-распределенных данных нами были применены показатели геостатистики [14]. С целью уточнения статистических данных были построены автокорреляционные функции (АКФ) случайно распределенных величин некоторых исследуемых параметров (рисунок). Наличие автокорреляции обнаруживается, если она выходит за доверительные границы интервала. По данным [11], поле считается неоднородным, если функция обнаруживается хотя бы в отношении одного из исследуемых показателей. Перечисленные аргументы подтверждают закономерный характер внутрипольной неоднородности участка.





Коррелограмма значений урожайности (а), гумуса (б), подвижного фосфора (в) и подвижного калия (г), где Corr. – коэффициент корреляции; S.E. – стандартная ошибка; Lag – нормированное расстояние между точками опробования; Q, p – вероятность корреляции; Conf.Limit – доверительный интервал
 Correlogram of the values of yield (a), humus (b), mobile phosphorus (c) and mobile potassium (d), where Corr. is the correlation coefficient; S.E. is the standard error; Lag is the normalized distance between sampling points; Q, p is the probability of correlation; Conf.Limit is the confidence interval

Исключением являлась АКФ урожайных данных яровой пшеницы, по поведению которой земельный массив отнесен к выровненному по плодородию. По агрохимическим показателям, напротив, участок отличался существенным варьированием. Аналогичные результаты были отражены в исследованиях [15]. Таким образом, согласно обобщению геостатистической информации мы можем отнести анализируемый участок к невыровненному по почвенному плодородию. Поэтому при закладке полевого опыта необходимо выбирать соответствующие элементы методики: рендомизированный метод размещения повторностей, прямоугольную или удлиненную формы делянок, число повторностей не менее шести. Также при выборе количества точек опробования для характеристики предметов исследования необходимо руководствоваться уровнем пространственного варьирования.

ВЫВОДЫ

1. Вариабельность агрохимических показателей агросерой почвы отличалась широким размахом: минимальное значение обнаруживалось для реакции почвенной среды, максимальное было характерно для содержания гумуса.
2. По уровню изменчивости показатели выстроились в следующем порядке: урожайность (40 %) > гумус (19 %) > P₂O₅ (13 %) > K₂O (10 %) > рН_{H₂O} (4 %).
3. Выявлена значительная вариабельность общей и продуктивной кустистости, озерненности колоса, массы 1000 зерен. Слабее изменялось пространственное варьирование длины растений и длины колоса.
4. Поведение автокорреляционной функции агрохимических показателей агросерой почвы свидетельствовало об их колебаниях, выходящих за рамки стационарности с вероятностью 0,95. Характер варьирования плодородия был существенным, что определило организацию повторений на опытном стационаре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савин И.Ю., Бербеков С.А., Тутукова Д.А. Комплексная оценка неоднородности почвенного покрова по состоянию сельскохозяйственных культур // Вестник Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2022. – № 113. – С. 31–57.
2. Burrough P.A. Soil variability: a late 20th century view // *Soils Fert.* – 1993. – Vol. 56(5). – P. 529–562.
3. Cambardella C.A., Karlen D.L. Spatial analysis of soil fertility parameters // *Precis. Agric.* – 1999. – Vol. 1. – P. 5–14.
4. Cassel D.K., Wendroth O., Nielsen D.R. Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: opportunities arising from spatial dependence // *Agronomy J.* – 2000. – Vol. 92. – P. 706–714.
5. Мудрых Н.М., Самофалова И.А. Моделирование пространственной изменчивости агрохимических показателей почв в агроландшафтах нечерноземья // *Агрохимический вестник.* – 2019. – № 5. – С. 17–24.
6. Кирюшин В.И. Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // *Почвоведение.* – 2019. – № 9. – С. 1130–1139.
7. Добротворская Н.И. Агроэкологическая типизация земель – необходимый этап в проектировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2019. – № 1. – С. 7–17.
8. Самсонова В.П. Научное наследие заслуженного профессора Е.А. Дмитриева // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. – 2022. – № 2. – С. 3–12.
9. Белоусова Е.Н., Белоусов А.А., Демьяненко Т.Н. Оценка пространственной вариабельности агрохимических свойств агрочерноземов при планировании полевого опыта // 90 лет на службе земледелия и растениеводства: мат-лы междунар. науч. конф., Агрофизический институт: – СПб., 2022. – С. 895–901.
10. ОСТ 10 106-87. Опыты полевые с удобрениями. Порядок проведения. – М., 1987.
11. Пространственная неоднородность почвенного покрова и агрохимических показателей почв Солигорского района / Н.В. Клебанович, А.Л. Киндеев, А.А. Сазонов [и др.] // *Земля Беларуси.* – 2019. – № 1. – С. 39–48.
12. Клебанович Н.В., Киндеев А.Л., Сазонов А.А. Геостатистический анализ при картографировании пространственной неоднородности влажности и кислотности почв // *Геосферные исследования.* – 2021. – № 3. – С. 80–91.
13. Воробьева Л.А. Теория и практика химического анализа почв. – М.: ГЕОС, 2006. – 400 с.
14. Goovaerts P. Geostatistical modelling of uncertainty in soil science // *Geoderma.* – 2001. – Vol. 103. – № 1/2. – P. 3–26.
15. Информационное обеспечение современных систем земледелия в России / В.П. Якушев, В.В. Якушев, С.Ю. Блохина [и др.] // Вестник РАН. – 2021. – Т 91. № 8. – С. 755–768.
16. Trends in scientific research on precision farming in agriculture using science mapping method / D. Maloku, P. Balogh, A. Bai [et al.] / *International Review of Applied Sciences and Engineering IRASE.* – 2020. – Vol. 11 (3). – P. 232–242.

REFERENCES

1. Savin I.Ju., Berbekov S.A., Tutukova D.A., *Vestnik Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2022, No. 113, pp. 31–57. (In Russ.)
2. Burrough P.A., Soil variability: a late 20th century view, *Soils Fert*, 1993, Vol. 56 (5), pp. 529–562.
3. Cambardella C.A., Karlen D.L., Spatial analysis of soil fertility parameters, *Precis. Agric*, 1999, Vol. 1, pp. 5–14.
4. Cassel D.K., Wendroth O., Nielsen D.R., Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: opportunities arising from spatial dependence, *Agronomy J.*, 2000, Vol. 92, pp. 706–714.
5. Mudryh N.M., Samofalova I.A., *Agrohimicheskij vestnik*, 2019, No. 5, pp. 17–24. (In Russ.)
6. Kirjushin V.I., *Pochvovedenie*, 2019, No. 9, pp. 1130–1139. (In Russ.)
7. Dobrotvorskaja N.I., *Vestnik NGAU*, 2019, No. 1, pp. 7–17. (In Russ.)
8. Samsonova V.P., *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 17. Pochvovedenie*, 2022, No. 2, pp. 3–12. (In Russ.)

9. Belousova E.N., Belousov A.A., Dem'janenko T.N., *90 let na sluzhbe zemledelija i rastenievodstva (90 years in the service of agriculture and crop production)*, Materials of the international scientific conference, Saint-Petersburg, 2022, pp. 895–901. (In Russ.)
10. *Otraslevoj standart «Opyty polevye s udobrenijami. Porjadok provedenija»*, 1987. (In Russ.)
11. Klebanovich N.V., Kindeev A.L., Sazonov A.A., *Zemlja Belarusi*, 2019, No. 1, pp. 39–48. (In Russ.)
12. Klebanovich N.V., Kindeev A.L., Sazonov A.A., *Geosfernye issledovanija*, 2021, No. 3, pp. 80–91. (In Russ.)
13. Vorob'eva L.A., *Teorija i praktika himicheskogo analiza pochv (Theory and practice of chemical analysis of soils)*, Moscow: GEOS, 2006, 400 p.
14. Goovaerts P., Geostatistical modelling of uncertainty in soil science, *Geoderma*, 2001, Vol. 103, No. 1/2, pp. 3–26.
15. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Blokhina S.Yu., Blokhin Yu.I., Matvienko D.A., *Vestnik RAN*, 2021, Vol. 91, No. 8, pp. 755–768. (In Russ.)
16. Maloku D., Balogh P., Bai A., Gabnai Z., Lengyel P., Trends in scientific research on precision farming in agriculture using science mapping method, *International Review of Applied Sciences and Engineering IRASE*, 2020, Vol. 11 (3), pp. 232–242.