

УДК 631.41:631.811+519.2

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-395-06-101-108

И.А. Сахабиев ✉

К.Г. Гиниятуллин

Е.В. Смирнова

Казанский (Приволжский)
федеральный университет,
Казань, Россия

✉ IlnASahabiev@kpfu.ru

Поступила в редакцию: 28.02.2025

Одобрена после рецензирования: 09.05.2025

Принята к публикации: 24.05.2025

© Сахабиев И.А., Гиниятуллин К.Г.,
Смирнова Е.В.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-395-06-101-108

Ilnas A. Sakhabiev ✉

Kamil G. Giniyatullin

Elena V. Smirnova

Kazan (Volga region) Federal
University, Kazan, Russia

✉ IlnASahabiev@kpfu.ru

Received by the editorial office: 28.02.2025

Accepted in revised: 09.05.2025

Accepted for publication: 24.05.2025

© Sakhabiev I.A., Giniyatullin K.G.,
Smirnova E.V.

Использование статистики каппа для оценки многолетних изменений внутрипольной неоднородности содержания доступных форм фосфора и калия

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Внедрение роботизированной техники дифференцированного внесения удобрений делает востребованным изучение внутрипольной неоднородности обеспеченности пахотных угодий элементами питания. Необходимо оценивать структуру пространственной неоднородности и направленности изменений в длительной перспективе. Использование в разные годы разных методов определения доступных форм элементов питания затрудняет сопоставление многолетних данных.

Методы. Использовали многолетние (1965 г., 1987 г., 2021 г.) данные содержания подвижного фосфора (P_2O_5) и обменного калия (K_2O) в почвах сортоиспытательного участка Республики Татарстан. Содержание P_2O_5 определяли по Труogu (1965 г.) и Кирсанову (1987 г., 2021 г.), а содержание K_2O — по Масловой (1965 г., 1987 г.) и Кирсанову (2021 г.). Согласованность по оценке обеспеченности рассчитывали по коэффициенту согласия каппа Коэна.

Результаты. Обеспеченность P_2O_5 по коэффициенту каппа показывает между 1965 г. и 1987 г. умеренное совпадение ($\kappa = 0,45$), между 1987 г. и 2021 г. — существенное совпадение ($\kappa = 0,62$). Обеспеченность K_2O между 1965 г. и 1987 г. имеет очень слабое совпадение ($\kappa = 0,10$), между 1987 г. и 2021 г. — удовлетворительное совпадение ($\kappa = 0,25$). В отличие от P_2O_5 структура пространственной неоднородности обеспеченности K_2O при длительном использовании сохраняется в слабой степени. Обеспеченность полей P_2O_5 и K_2O с 1965 по 1987 г. существенно увеличилась, с 1987 по 2021 г. — уменьшилась. Внутрипольная вариабельность показателей с 1965 по 2021 г. увеличивалась от средней до высокой (до близкой к очень высокой (P_2O_5)).

Ключевые слова: подвижный фосфор, обменный калий, внутрипольная пространственная неоднородность, многолетняя динамика, статистика каппа

Для цитирования: Сахабиев И.А., Гиниятуллин К.Г., Смирнова Е.В. Использование статистики каппа для оценки многолетних изменений внутрипольной неоднородности содержания доступных форм фосфора и калия. *Аграрная наука*. 2025; 395(06): 101–108. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-395-06-101-108>

The use of Kappa statistics to assess long-term changes in the intrafield heterogeneity of the content of available forms of phosphorus and potassium

ABSTRACT

Relevance. The introduction of robotic technology for differentiated application of fertilizers makes it necessary to study the intra-field heterogeneity of the availability of arable land with nutrients. It is necessary to evaluate the structure of spatial heterogeneity and the direction of changes in the long term. The use of different methods for determining available forms of nutrients in different years makes it difficult to compare long-term data.

Methods. Long-term (1965, 1987, 2021) data on the content of mobile phosphorus (P_2O_5) and exchangeable potassium (K_2O) in the soils of the crop testing site of the Republic of Tatarstan were used. The P_2O_5 content was determined according to Truog (1965) and Kirsanov (1987, 2021), and the K_2O content according to Maslova (1965, 1987) and Kirsanov (2021). Agreement in the assessment of availability was calculated using Cohen's kappa coefficient.

Results. The availability of P_2O_5 by the Kappa coefficient shows a moderate coincidence between 1965 and 1987 ($\kappa = 0.45$), and a significant coincidence between 1987 and 2021 ($\kappa = 0.62$). The availability of K_2O between 1965 and 1987 has a very weak coincidence ($\kappa = 0.10$), between 1987 and 2021 — a satisfactory coincidence ($\kappa = 0.25$). In contrast to P_2O_5 , the structure of spatial heterogeneity of K_2O availability remains weak during prolonged use. The availability of P_2O_5 and K_2O fields increased significantly from 1965 to 1987, and decreased from 1987 to 2021. The intra-field variability of the indicators increased from medium to high (to close to very high (P_2O_5)) from 1965 to 2021.

Key words: mobile phosphorus, exchangeable potassium, intrafield spatial heterogeneity, long-term dynamics, kappa statistics

For citation: Sakhabiev I.A., Giniyatullin K.G., Smirnova E.V. The use of Kappa statistics to assess long-term changes in the intrafield heterogeneity of the content of available forms of phosphorus and potassium. *Agrarian science*. 2025; 395(06): 101–108 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-395-06-101-108>

Введение/Introduction

Анализ многолетней изменчивости свойств почв и продуктивности посевов — важнейшая задача длительных почвенных исследований, вместе с тем методические подходы к их проведению остаются еще в недостаточной степени проработанными [1]. Актуальной задачей современной агрохимии является изучение направленности изменений внутрипольной пространственной неоднородности пахотных угодий по содержанию доступных форм питательных элементов при длительном и интенсивном использовании земель. Особенно важным проведение данных исследований становится в последние десятилетия в связи с широким внедрением в сельскохозяйственное производство информационных технологий цифрового земледелия и использования роботизированной техники¹ для дифференцированного внесения минеральных удобрений [2–5].

Технологии точного (прецизионного) земледелия строятся на оценке пространственной и временной неоднородности пахотных угодий и ориентированы, в отличие от традиционных технологий, на адаптацию самой системы земледелия к внутрипольной неоднородности отдельных почвенных свойств, включая агрохимические свойства [6]. Очевидно, что стратегия применения технологий точного земледелия в будущем, в том числе систем дифференцированного внесения удобрений, делает необходимым разработку новых методов изучения и количественного описания как пространственной, так временной неоднородности сельскохозяйственных угодий, а также методов оценки направленности изменения показателей состояния почвенного покрова [7].

В данном аспекте становится особенно важной оценка изменчивости пространственной структуры внутрипольной неоднородности агрохимических показателей почв на длительную перспективу во временные промежутки, измеряемые как минимум десятилетиями [8]. Однако решение этой задачи имеет определенные трудности, в том числе связанные с использованием в разные годы разных методов оценки обеспеченности пашни доступными элементами питания, что делает затруднительным сопоставление имеющихся многолетних агрохимических данных.

Для решения настоящей задачи могут быть весьма полезны статистические подходы, направленные на оценку согласованности (несогласованности) данных, полученных разными методами, различными оценщиками, или проведенные в разное время. Такие, например, как статистика каппа Коэна или метод

Бланда — Алтмана [9, 10]. Известно, что указанные методы дают более надежную оценку согласованности (несогласованности) оценок, чем традиционные подходы, основанные на оценке коэффициента корреляции или построения регрессионных моделей [11].

В последнее время методы оценки согласованности данных находят достаточно широкое применение и в почвоведении. Обычно для сравнения почвенных и тематических почвенных карт, полученных экспертным и цифровым картографированием, разными методами цифрового картографирования, а также группами, проводившими работы в разное время [9, 12, 13]. К достоинствам статистики каппа можно отнести то, что при достаточной простоте расчетов при оценке согласованности учитывается вероятность случайных совпадений, что существенно повышает надежность оценок.

Цель работы — на примере полей государственного сортоиспытательного участка (ГСУ) изучить возможности использования статистики каппа для оценки направленности многолетних изменений внутрипольной пространственной неоднородности содержания доступных форм фосфора и калия, определенных с применением различных методов.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Для выполнения работы были использованы данные агрохимического обследования почв Арского ГСУ, проводившегося сотрудниками кафедры почвоведения Казанского университета с 1965 по 2021 г. Арский ГСУ расположен на территории Западного Предкамья Республики Татарстан (N: 56°06'46.6", E: 49°46'31.4"). Рельеф исследованного участка представлен слабопологим склоном, постепенно снижающимся к южной части участка.

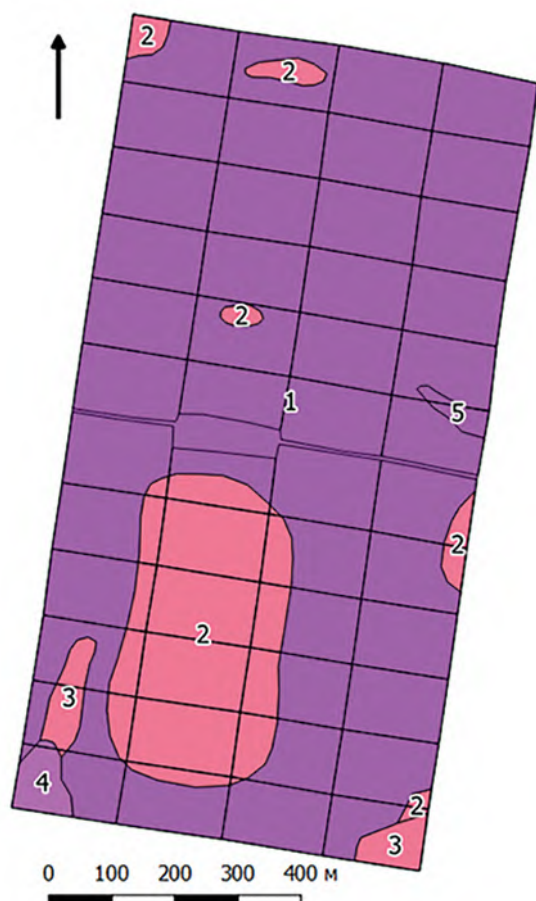
На территории Арского ГСУ распространены различные вариации светло-серых лесных почв тяжелосуглинистого гранулометрического состава, сформированных на карбонатных глинах и делювиальных суглинках, а также дерново-слабоподзолистые тяжелосуглинистые почвы на делювиальных суглинках (рис. 1). Выбор для проведения исследований полей ГСУ был связан прежде всего с тем, что поля сортоиспытательных участков можно отнести к угодьям интенсивного использования, а также на них традиционно строго соблюдали научно обоснованные технологии выращивания сельскохозяйственных культур, вносили расчетные дозы минеральных и органических удобрений и регулярно проводили мероприятия по комплексному агрохимическому окультуриванию полей².

¹ Российскому агропромышленному комплексу необходимы космические технологии и робототехнические системы. Аграрная наука. 2021; (4): 99.

² Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. I. Общая часть. Москва. 2019; 329.

Рис. 1. Почвенная карта с наложенной схемой отбора объединенных проб: 1. Светло-серая лесная тяжелосуглинистая почва на делювиальных карбонатных глинах. 2. Дерново-слабоподзолистая тяжелосуглинистая почва на делювиальных суглинках. 3. Дерново-слабоподзолистая слабосмытая тяжелосуглинистая почва на делювиальных суглинках. 4. Светло-серая лесная пестроцветная тяжелосуглинистая почва на делювиальных суглинках. 5. Светло-серая лесная слабосмытая тяжелосуглинистая почва на делювиальных суглинках

Fig. 1. A soil map with a superimposed combined sampling scheme: 1. Light gray forest heavy loamy soil on deluvial carbonate clays. 2. Sod-slightly podzolic heavy loamy soil on deluvial loams. 3. Sod-slightly podzolic slightly washed heavy loamy soil on deluvial loams. 4. Light gray forest variegated heavy loamy soil on deluvial loams. 5. Light gray forest slightly washed soil heavy loam on deluvial loam



При проведении первого обследования в 1965 г. территория ГСУ была поделена на прямоугольные элементарные участки (1–1,5 га). Объединенные образцы составляли из 20–40 индивидуальных проб, отобранных по маршруту вдоль длинной стороны элементарных участков тростевым буром на всю глубину пахотного слоя. При проведении агрохимических обследований в последующие годы схема отбора проб сохранялась. Всего отобрали и проанализировали по 48 смешанных образцов.

Для изучения многолетней динамики содержания подвижного фосфора и обменного калия использовали данные агрохимических обследований, проведенных в 1965 г., 1987 г. и 2021 г. Определение содержания доступного P_2O_5 проводили в 1965 г. по методу Труога³, в 1987 г. и 2021 г. — по методу Кирсанова⁴, K_2O в 1965 г. и 1987 г. — по методу Масловой⁵, в 2021 г. — по методу Кирсанова⁴.

В таблице 1 представлены статистические параметры пространственного варьирования агрохимических показателей на обследованной территории в разные годы, полученных с использованием разных методов анализа.

Для оценки обеспеченности почв доступными формами фосфора и калия, определенных различными методами, использовали градации (табл. 2)⁶.

Для нахождения коэффициента согласия каппа Коэна (κ) использовали методику расчетов, описанную в работе⁷ Предварительно строили таблицы сопряженности, в которых представлялись результаты оценки обеспеченности почв элементом питания на одних и тех же элементарных участках отбора смешанных проб, полученных при использовании разных методов анализа или анализов, проведенных одним методом в разные годы.

Теоретическая таблица сопряженности оценок обеспеченности почв элементом питания представлена в таблице 3. При составлении таблицы сопряженности по ее диагонали (выделено

Таблица 1. Описательные статистики результатов определения содержания доступных форм фосфора и калия

Table 1. Descriptive statistics of the results of determination of the content of available forms of phosphorus and potassium

Показатели	1965 г.		1987 г.		2021 г.	
	P_2O_5 по Труогу	K_2O по Масловой	P_2O_5 по Кирсанову	K_2O по Масловой	P_2O_5 по Кирсанову	K_2O по Кирсанову
Минимум, мг/кг	170	145	174	161	171	81
Максимум, мг/кг	401	255	462	366	515	298
Размах варьирования, мг/кг	231	110	288	205	344	217
Среднее значение, мг/кг	265,0	191	317,2	215,5	301,2	176,4
Коэффициент вариации, %	19,4	16,3	25,5	22,1	32,1	26,5
Оценка вариабельности	средняя	средняя	высокая	высокая	высокая	высокая

³ Гинзбург К.Е. Методы определения фосфора в почве. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука. 1975; 106–190.

⁴ ГОСТ 26207-84 Почвы. Определение подвижных форм фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО М.: Издательство стандартов. 1989.

⁵ Важенин И.Г. Методы определения калия в почве. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука. 1975; 191–218.

⁶ Флоринский М.А., Лунев М.И., Кузнецов А.В. и др. Методические указания по проведению комплексного агрохимического обследования почв сельскохозяйственных угодий. М.: Центр научно-технической информации, пропаганды и рекламы. 1994; 96.

⁷ Rossiter D.G. Assessing the thematic accuracy of area-class soil maps. Enschede. Holland: Soil Science Division. 2001; 46.

Таблица 2. Группировка почв по обеспеченности подвижным фосфором и обменным калием

Table 2. Grouping of soils according to the content of mobile phosphorus and exchangeable potassium

Группа обеспеченности	Обеспеченность	Подвижный фосфор (мг/кг) по методу:		Обменный калий (мг/кг) по методу:	
		Труога	Кирсанова	Масловой	Кирсанова
I	Очень низкая	< 30	< 25	< 50	< 40
II	Низкая	31–70	26–50	51–100	40–80
III	Средняя	71–120	51–100	101–150	81–120
IV	Повышенная	121–180	101–150	150–200	121–170
V	Высокая	181–250	151–250	201–300	171–250
VI	Очень высокая	> 250	> 250	> 300	> 250

Таблица 3. Теоретическая таблица сопряженности оценок обеспеченности почв элементами питания при использовании различных методов анализа

Table 3. Theoretical table of conjugacy of estimates of soil availability of nutrients using various methods of analysis

Градации обеспеченности		Градации обеспеченности при использовании метода Б (или другого года обследования)						Сумма
		I *	II	III	IV	V	VI	
Градации обеспеченности при использовании метода А (или другого года обследования)	I	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₊
	II	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₊
	III	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	X ₃₅	X ₃₆	X ₃₊
	IV	X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	X ₄₄	X ₄₅	X ₄₆	X ₄₊
	V	X ₅₁	X ₅₂	X ₅₃	X ₅₄	X ₅₅	X ₅₆	X ₅₊
	VI	X ₆₁	X ₆₂	X ₆₃	X ₆₄	X ₆₅	X ₆₆	X ₆₊
Сумма		X ₊	X ₊	X ₊	X ₊	X ₊	X ₊	n

Примечание: * градации обеспеченности: I — очень низкая, II — низкая, III — средняя, IV — повышенная, V — высокая, VI — очень высокая.

серым цветом) представляется для каждого класса обеспеченности число образцов с совпадающими оценками, вне диагонали — несогласующиеся оценки обеспеченности.

По таблице 3 рассчитывается общая точность (θ_1) по формуле:

$$\theta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^r X_{ii}, \quad (1)$$

где: X_{ii} — совпадающие (расположенные по диагонали) значения оценок по каждому классу обеспеченности, получаемые при использовании разных методов; r — число градаций обеспеченности; n — общий объем выборки.

Затем рассчитывается гипотетическая вероятность случайного согласия (θ_2) по формуле:

$$\theta_2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i}), \quad (2)$$

где: X_{i+} — сумма совпадающих и несовпадающих значений оценок по каждому классу обеспеченности при использовании метода А (или одного года обследования); X_{+i} — сумма совпадающих и несовпадающих значений оценок по каждому классу обеспеченности при использовании метода Б (или другого года обследования); r — число градаций обеспеченности; n — общий объем выборки.

Значение коэффициента каппа рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2}, \quad (3)$$

Интерпретировали полученные значения коэффициента каппа, придерживаясь следующей градации согласованности⁸:

- < 0 — меньше, чем чисто случайное совпадение;
- 0,01–0,20 — слабое совпадение;
- 0,21–0,40 — удовлетворительное совпадение;
- 0,41–0,60 — умеренное совпадение;
- 0,61–0,80 — существенное совпадение;
- 0,80–0,99 — почти полное совпадение.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В таблице 4 представлены показатели согласованности оценок обеспеченности почв подвижным фосфором, определенных в 1965 г. по методу Труога и в 1987 г. по методу Кирсанова. В таблице 5 — показатели согласованности оценок обеспеченности почв подвижным фосфором, определенных в 1987 г. и 2021 г. по методу Кирсанова.

В таблице 6 указаны показатели согласованности оценок обеспеченности почв подвижным калием, определенных в 1965 г. и в 1987 г. по

Таблица 4. Таблица сопряженности оценок обеспеченности почв подвижным фосфором, определенных в 1965 г. по методу Труога и в 1987 г. по методу Кирсанова

Table 4. Table of conjugacy of estimates of soil availability of mobile phosphorus, determined in 1965 by the Truog method and in 1987 by the Kirsanov method

Градации обеспеченности	Обследование в 1987 г. по методу Кирсанова						Сумма
	I	II	III	IV	V	VI	
Обследование 1965 г. по методу Труога	I	0	0	0	0	0	0
	II	0	0	0	0	0	0
	III	0	0	0	0	0	0
	IV	0	0	0	0	1	1
	V	0	0	0	0	10	10
	VI	0	0	0	0	1	25
Сумма	0	0	0	0	12	36	48

⁸ Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П., Докучаев П.М. Критерии для проверки точности моделей тематических карт. В кн. «Цифровая почвенная картография»: учеб. пособие. М.: РУДН. 2017; 156.

Таблица 5. Таблица сопряженности оценок обеспеченности почв подвижным фосфором, определенных в 1987 г. и 2021 г. по методу Кирсанова

Table 5. Table of conjugacy of estimates of soil availability of mobile phosphorus, determined in 1987 and 2021 using the Kirsanov method

Градации обеспеченности		Обследование в 2021 г. по методу Кирсанова						Сумма
		I	II	III	IV	V	VI	
Обследование 1987 г. по методу Кирсанова	I	0	0	0	0	0	0	0
	II	0	0	0	0	0	0	0
	III	0	0	0	0	0	0	0
	IV	0	0	0	0	0	0	0
	V	0	0	0	0	11	1	12
	VI	0	0	0	1	6	29	36
Сумма		0	0	0	1	17	30	48

методу Масловой, в таблице 7 — определенных в 1987 г. по методу Масловой и в 2021 г. по методу Кирсанова.

Из таблиц 4–7 сопряженности были рассчитаны показатели согласия — общая точность оценок (θ_1), гипотетическая вероятность случайного согласия (θ_2), значение коэффициента согласия каппа Коэна (κ) оценок обеспеченности пахотных угодий подвижным фосфором и подвижным калием, полученных в разные годы с применением разных методов (табл. 8). В таблице 8 для сопоставления приведены данные расчета коэффициента корреляции Пирсона (r) между показателями содержания подвижного фосфора и обменного калия, полученными в разные годы с применением разных методов.

Из анализа данных таблицы 8 можно сделать вывод, что обеспеченность фосфором по коэффициенту каппа показывает между обследованиями 1965 г. и 1987 г. умеренное совпадение ($\kappa = 0,45$), между обследованиями 1987 г. и 2021 г. существенное совпадение ($\kappa = 0,62$), хотя по коэффициенту корреляции Пирсона практически не наблюдается разницы по согласованности данных, значения коэффициента очень близки и составляют $r = 0,51$ и $r = 0,52$ соответственно.

Высокую согласованность можно объяснить тем, что содержание доступного фосфора в почвах является достаточно постоянным во времени, и даже за десятилетия интенсивного использования полей структура внутрипольной пространственной вариабельности сильно не меняется. Совсем иные закономерности наблюдаются по подвижному калию. Обеспеченность подвижным калием по коэффициенту каппа между данными 1965 г. и 1987 г. показывает очень слабое совпадение ($\kappa = 0,10$), но между данными 1987 г. и 2021 г. согласованность может оцениваться уже как удовлетворительная ($\kappa = 0,25$), в то время как корреляция между данными статистически незначима.

Можно сделать вывод, что структура внутрипольной пространственной неоднородности пахотных угодий по содержанию обменного калия,

Таблица 6. Таблица сопряженности оценок обеспеченности почв обменным калием, определенных в 1965 г. и в 1987 г. по методу Масловой

Table 6. Table of conjugation of estimates of soil availability of mobile potassium, determined in 1965 and in 1987 using the Maslova method

Градации обеспеченности		Обследование 1987 г. по методу Масловой						Сумма
		I	II	III	IV	V	VI	
Обследование 1965 г. по методу Масловой	I	0	0	0	0	0	0	0
	II	0	0	0	0	0	0	0
	III	0	0	0	1	4	0	5
	IV	0	0	0	13	6	8	27
	V	0	0	0	6	7	3	16
	VI	0	0	0	0	0	0	0
Сумма		0	0	0	20	17	11	48

Таблица 7. Таблица сопряженности оценок обеспеченности почв обменным калием, определенных в 1987 г. по методу Масловой и в 2021 г. по методу Кирсанова

Table 7. Table of conjugacy of estimates of soil availability of mobile potassium, determined in 1987 and in 2021 using the Kirsanov method

Градации обеспеченности		Обследование в 2021 г. по методу Кирсанова						Сумма
		I	II	III	IV	V	VI	
Обследование 1987 г. по методу Масловой	I	0	0	0	0	0	0	0
	II	0	0	0	0	0	0	0
	III	0	0	0	0	0	0	0
	IV	0	0	3	11	5	0	19
	V	0	0	1	5	9	2	17
	VI	0	0	0	4	4	4	12
Сумма		0	0	4	20	18	6	48

Таблица 8. Результаты расчетов показателей согласия оценок обеспеченности почв доступными формами фосфора и калия, полученных в разные годы с применением разных методов (общей точности (θ_1), гипотетической вероятности случайного согласия (θ_2), коэффициента согласия каппа Коэна (κ), коэффициента корреляции Пирсона (r))

Table 8. The results of calculations of the agreement indicators for estimates of soil availability of available forms of phosphorus and potassium obtained in different years using different methods (general accuracy (θ_1), hypothetical probability of accidental agreement (θ_2), Kappa Cohen agreement coefficient (κ), Pearson correlation coefficient (r))

Показатели статистики каппа и корреляции	Подвижный фосфор		Обменный калий	
	1965–1987 гг.	1987–2021 гг.	1965–1987 гг.	1987–2021 гг.
θ_1	0,73	0,83	0,42	0,50
θ_2	0,51	0,56	0,35	0,33
κ	0,45	0,62	0,10	0,25
r	R = 0,51 при p = 0,00*	R = 0,52 при p = 0,00*	R = 0,08 при p = 0,58	R = 0,23 при p = 0,12
Уменьшение обеспеченности элементарных участков	1	7	6	17
Увеличение обеспеченности элементарных участков	12	1	22	7

Примечание: * жирным шрифтом выделены статистически значимые при $p < 0,05$ коэффициенты корреляции Пирсона.

как более лабильного агрохимического показателя, при длительном интенсивном их использовании в земледелии сохраняется в достаточно слабой степени.

Данные оценки как среднего содержания (табл. 1), так и увеличения обеспеченности P_2O_5 и K_2O отдельных элементарных участков отбора проб (табл. 8) показывают, что с 1965 по 1987 г. происходило увеличение обеспеченности пашни доступными формами фосфора и калия. По данным исследований, проведенных сотрудниками кафедры почвоведения Казанского университета с 1965 по 1977 г., в целом по ГСУ Татарской АССР наблюдался положительный баланс содержания доступных элементов питания, который для Арского ГСУ составил +38 мг/кг для подвижного P_2O_5 и +42 кг/га для обменного K_2O , что подтверждалось статистическими данными, в которых показывалось увеличение доз, вносимых на поля ГСУ в данный период времени минеральных и органических удобрений [14, 15].

С 1987 по 2021 г., наоборот, наблюдали снижение обеспеченности полей доступными формами фосфора и калия как по средним показателям их содержания на обследованной территории, так и по уменьшению обеспеченности отдельных элементарных участков (табл. 8), что можно считать вполне ожидаемым. Хотя Республика Татарстан является одним из лидеров среди субъектов Российской Федерации по объемам применения удобрений, в среднем за последние десятилетия степень восполнения выноса NPK с урожаем составила лишь 80–88%, в том числе по фосфору — 60–63%, по калию — лишь 40–43%.

С начала 2000-х годов содержание P_2O_5 на пахотных землях устойчиво снижается со среднегодовыми темпами 0,72–0,75 мг/кг, а среднереспубликанские показатели ежегодного снижения содержания для K_2O достигают 0,08 мг/кг⁹. Во многом данные негативные тенденции определяются снижением внесения органических удобрений. Если под урожай 1992 г. в республике их было внесено 17,7 млн т (или 5,8 т/га), то в 2022-м — только 3,52 млн т (или 1,31 т/га)¹⁰.

Однако, несмотря на разнонаправленные тенденции изменения обеспеченности обследованных полей доступными формами элементов питания, сохраняется одна закономерность: как при увеличении обеспеченности, так и при снижении обеспеченности внутрипольная вариабельность

содержания P_2O_5 и K_2O только увеличивалась. Если в 1965 г. коэффициент вариации содержания P_2O_5 составил 19,4%, K_2O — 16,3%, то в 1987 г. для P_2O_5 значение коэффициента вариации составило 25,5%, для K_2O — 22,1%, а в 2021 году вариабельность P_2O_5 составляла уже 32,1%, K_2O — 26,5%.

Иными словами, несмотря на различные тенденции изменения обеспеченности полей за 56 лет наблюдений, внутрипольная неоднородность содержания доступных форм фосфора и калия обследованной территории увеличилась от средней вариабельности до высокой (по фосфору близкой к очень высокой). Если данная тенденция сохранится в будущем, необходимость выравнивания полей по обеспеченности доступными элементами питания с применением технологий дифференцированного внесения минеральных удобрений, видимо, может стать безальтернативной.

Выводы/Conclusions

Анализ обеспеченности полей Арского ГСУ подвижным фосфором, проведенный с использованием коэффициента каппа, выявил умеренное совпадение данных между обследованиями в 1965 г. и 1987 г. (по методикам Труога и Кирсанова). В то же время между обследованиями в 1987 г. и 2021 г. (по методике Кирсанова) наблюдалось существенное совпадение. Однако при оценке согласованности данных с помощью коэффициента корреляции Пирсона значимых различий не выявлено: значения коэффициента составили $r = 0,51$ для 1965–1987 гг. и $r = 0,52$ для 1987–2021 гг.

Что касается обеспеченности полей калием, анализ по коэффициенту каппа показал очень слабое совпадение данных между 1965 г. и 1987 г. (по методике Масловой). При этом между данными 1987 г. и 2021 г. (по методикам Масловой и Кирсанова) согласованность может быть оценена как удовлетворительная. Однако статистически значимая корреляция между данными отсутствует, что указывает на необходимость учета дополнительных факторов при интерпретации результатов.

Таким образом, результаты анализа демонстрируют различную степень согласованности данных в зависимости от используемых методик и временных периодов, что подчеркивает важность комплексного подхода при оценке динамики изменения обеспеченности почв питательными элементами.

⁹ Система земледелия Республики Татарстан. Инновации на базе традиций. Ч. 1. Общие аспекты системы земледелия. Казань: Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Татарстан. 2012; 168.

¹⁰ Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2022 году. Казань: Министерство экологии и природных ресурсов Республики Татарстан. 2023; 396.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение № 39/2024-ПД).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фрид А.С. Пространственное варьирование и временная динамика плодородия почв в длительных полевых опытах. М.: Россельхозакадемия. 2002; 80. ISBN 5-94873-006-9
2. Гриц Н.В., Ростовцев Р.А., Диченский А.В. Использование элементов точного сельского хозяйства для получения климатически обоснованной урожайности сельскохозяйственных культур в специализированных севооборотах. *Аграрная наука*. 2023; (10): 88–94. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-375-10-88-94>
3. Измайлов А.Ю., Годжаев З.А., Сычев В.Г., Афанасьев Р.А. Робототехника в агрохимии точного земледелия. *Плодородие*. 2018; (1): 53–57. <https://www.elibrary.ru/yphkxyt>
4. Якушев В.П. Цифровые технологии точного земледелия в реализации приоритета «умное сельское хозяйство». *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019; (2): 11–15. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/2/11-15>
5. Fountas S. et al. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015; 115: 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.011>
6. Oliver M.A. An Overview of Geostatistics and Precision Agriculture. Oliver M. (ed.). *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Dordrecht: Springer. 2010; 1–34. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8_1
7. Potdar R.P., Shirolkar M.M., Verma A.J., More P.S., Kulkarni A. Determination of soil nutrients (NPK) using optical methods: a mini review. *Journal of Plant Nutrition*. 2021; 44(12): 1826–1839. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1884702>
8. Чеботарев Н.Т., Броварова О.В. Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на продуктивность агроценозов Европейского Северо-Востока. *Аграрная наука*. 2022; (5): 87–92. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-359-5-87-92>
9. Rossiter D.G. Assessing the thematic accuracy of area–class soil maps. Enschede, Holland: *Soil Science Division*. 2001; 46.
10. Jo J., Son Y., Park M.-K., Lee J.Y., Chu H., Ahn Y.G. Statistical comparison for assessing agreement between two mass spectrometric methods for the analysis of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and furans (PCDDs/Fs) in contaminated soils. *Chemosphere*. 2024; 363: 142806. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142806>
11. Yellareddygar S.K.R., Gudmestad N.C. Bland-Altman comparison of two methods for assessing severity of Verticillium wilt of potato. *Crop Protection*. 2017; 101: 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.07.019>
12. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. Количественный метод сравнения почвенных карт и картограмм. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2011; (3): 3–5. <https://www.elibrary.ru/okkhan>
13. Пастухов А.В., Каверин Д.А., Щанов В.М. Построение региональных цифровых тематических карт (на примере карты запасов углерода в почвах бассейна р. Усы). *Почвоведение*. 2016; (9): 1042–1051. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090100>
14. Колоскова А.В. (ред.). Фосфор в почвах Волжско-Камской лесостепи. Казань: *Издательство Казанского университета*. 1984; 107.
15. Колоскова А.В. (ред.). Калий в почвах Волжско-Камской лесостепи. Казань: *Издательство Казанского университета*. 1985; 119.

FUNDING

The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of sciences (postdoctoral fellows) for the purpose of defending their doctoral dissertation, performing research, as well as performing labor functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan “Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan” (agreement No. 39/2024-PD).

REFERENCES

1. Frid A.S. Spatial variation and temporal dynamics of soil fertility in long-term field experiments. Moscow: *Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2002; 80 (in Russian). ISBN 5-94873-006-9
2. Grits N.V., Rostovtsev R.A., Dichensky A.V. The use of elements of digital agriculture to obtain climate-based crop yields in specialized crop rotations. *Agrarian science*. 2023; (10): 88–94 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-375-10-88-94>
3. Izmailov A.Yu., Gojaev Z.A., Sychev V.G., Afanasyev R.A. Robotics in agrochemistry of precision agriculture. *Plodородие*. 2018; (1): 53–57 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yphkxyt>
4. Yakushev V.P. Digital technologies of precision farming in implementation of smart farming priority. *Vestnik of the Russian agricultural science*. 2019; (2): 11–15 (in Russian). <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/2/11-15>
5. Fountas S. et al. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015; 115: 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.011>
6. Oliver M.A. An Overview of Geostatistics and Precision Agriculture. Oliver M. (ed.). *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Dordrecht: Springer. 2010; 1–34. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8_1
7. Potdar R.P., Shirolkar M.M., Verma A.J., More P.S., Kulkarni A. Determination of soil nutrients (NPK) using optical methods: a mini review. *Journal of Plant Nutrition*. 2021; 44(12): 1826–1839. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1884702>
8. Chebotarev N.T., Brovarova O.V. The effect of long-term use of organic and mineral fertilizers on the productivity of agroecosystems of the European Northeast. *Agrarian science*. 2022; (5): 87–92 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-359-5-87-92>
9. Rossiter D.G. Assessing the thematic accuracy of area–class soil maps. Enschede, Holland: *Soil Science Division*. 2001; 46.
10. Jo J., Son Y., Park M.-K., Lee J.Y., Chu H., Ahn Y.G. Statistical comparison for assessing agreement between two mass spectrometric methods for the analysis of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and furans (PCDDs/Fs) in contaminated soils. *Chemosphere*. 2024; 363: 142806. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142806>
11. Yellareddygar S.K.R., Gudmestad N.C. Bland-Altman comparison of two methods for assessing severity of Verticillium wilt of potato. *Crop Protection*. 2017; 101: 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.07.019>
12. Samsonova V.P., Meshalkina Yu.L. Quantitative method of soil maps and cartograms comparison. *Moscow University Bulletin. Series 17: Soil science*. 2011; (3): 3–5 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/okkhan>
13. Pastukhov A.V., Kaverin D.A., Shchanov V.M. The creation of digital thematic soil maps at the regional level (with the map of soil carbon pools in the Usa River basin as an example). *Eurasian Soil Science*. 2016; 49(9): 979–987. <https://doi.org/10.1134/S1064229316090106>
14. Koloskova A.V. (ed.). Phosphorus in the soils of the Volga-Kama forest-steppe. Scientific editor. Kazan: *Publishing house of Kazan University*. 1984; 107 (in Russian).
15. Koloskova A.V. (ed.). Potassium in the soils of the Volga-Kama forest-steppe. Kazan: *Publishing house of Kazan University*. 1985; 119 (in Russian).

ОБ АВТОРАХ

Ильназ Алимович Сахабиев

кандидат биологических наук, доцент
 lnASahabiev@kpfu.ru
<http://orcid.org/0000-0003-4339-9704>

Камиль Гашикович Гиниятуллин

кандидат биологических наук, доцент
 ginijatullin@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-4102-2209>

Елена Васильевна Смирнова

кандидат биологических наук, доцент,
 заведующая кафедрой
 elenavsmirnova@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-3081-7615>

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
 ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Ilnaz Alimovich Sakhabiev

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
 lnASahabiev@kpfu.ru
<http://orcid.org/0000-0003-4339-9704>

Kamil Gashikovich Giniyatullin

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
 ginijatullin@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-4102-2209>

Elena Vasilyevna Smirnova

Candidate of Biological Sciences,
 Associate Professor, Head of the Department
 elenavsmirnova@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-3081-7615>

Kazan (Volga region) Federal University,
 18 Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russia

15–17 ОКТЯБРЯ 2025

АГРОРУСЬ

34-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ АГРОПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА



РЕКЛАМА



КОНГРЕССНАЯ ПРОГРАММА



ЭКСПОЗИЦИИ РЕГИОНОВ



ЦЕНТР ДЕЛОВЫХ КОНТАКТОВ

ОТРАСЛЕВОЙ КОНКУРС
«ЗОЛОТАЯ МЕДАЛЬ»

AGRORUS.EXPOFORUM.RU

ПО ВОПРОСАМ УЧАСТИЯ:

+7 (812) 240 40 40, ДОБ. 2980, 2427, 2401

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, ПЕТЕРБУРГСКОЕ ШОССЕ, 64/1 | КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

16+

