

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАХОТНОЙ СВЕТО-СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ В ТЕЧЕНИИ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ**И. А. Сахабиев, Л. Г. Гаффарова, К. Г. Гиниятуллин, Е. В. Смирнова**

Реферат. Исследования проводили с целью оценки изменения пространственной структуры подвижных форм азота, фосфора и калия в пахотном слое светло-серой лесной почвы в Республике Татарстан с 1965 по 2021 годы. Многолетние данные агрохимических обследований обрабатывали методом геостатистического вариограммного анализа, отражающего изменение дисперсии показателей с расстоянием. В течение почти 60 лет происходит заметное изменение не только содержания подвижных форм элементов питания, но и их пространственной структуры. Диапазоны автокорреляции (расстояние максимальной схожести показателя в пространстве) подвижного фосфора в 1965 и 1975 годах составляли 185 и 205 м соответственно. К 1980 году величина этого показателя возросла до 459 м, а в 2011 году достигла максимума (778 м). Диапазон автокорреляции подвижного калия увеличился с 213 м (1965 год) до 439 м (2021 год), гидролизуемого азота – с 266 м (1975 год) до 550 м (2021 год). Вариограммы гидролизуемого азота в 1987 и 2011 годах свидетельствуют о закономерном изменении в пространстве (пространственный тренд). Соотношение элементов вариограмм (нагет/порог), по которому оценивают пространственную зависимость показателя (взаимовлияние показателя, исходя из его расположения в пространстве), позволило провести сравнительный анализ пространственной структуры исследуемых свойств со временем. Для гидролизуемого азота с 1975 по 1980 годы пространственная зависимость была умеренной (нагет/порог в пределах 25...75 %), с 1987 по 2011 годы – сильной (нагет/порог < 25 %). Для подвижного фосфора она была преимущественно сильной, за исключением 1975 года (умеренная), а для подвижного калия – в 1975 году слабой (> 75 %), в 1965, 1980 и 1987 годах – умеренной. По сравнению с гидролизуемым азотом, подвижные формы фосфора и калия характеризуются более стабильной пространственной структурой, но отмечена тенденция увеличения диапазона автокорреляции.

Ключевые слова: агрохимические свойства почв, пространственно-временная неоднородность, вариограммный анализ, геостатистический анализ, многолетние данные, плодородие почв.

Введение. Для эффективного управления почвенными ресурсами в целях обеспечения продовольственной безопасности и рационального природопользования требуется точная информация о пространственных изменениях свойств почвенного покрова. За последние десятилетия изучение пространственной вариабельности почвенных свойств получило бурное развитие, благодаря, прежде всего, широкой доступности компьютерных и информационных технологий [1, 2, 3]. Теоретическая значимость подобных исследований сводится к оценке закономерностей пространственного распределения исследуемых показателей. Практическое преимущество исследования пространственной неоднородности почвенных свойств заключается в разработке точных карт агрохимических свойств почв для целей дифференцированного применения удобрений и мелиорантов [4, 5].

Геостатистические модели эффективны для моделирования геопространственных данных, что позволяет определять пространственную структуру почвенных показателей [6, 7, 8]. Модели машинного обучения, которые все больше применяются в исследовании пространственного распределения почвенных показателей, не всегда эффективны, поскольку могут не учитывать пространственную автокорреляцию исследуемых показателей [9]. В целом геостатистические методы остаются популярными для оценки пространственного распределения показателей почвенного

плодородия [10, 11].

Исследование пространственной неоднородности почвенных показателей, как правило, относится к одномоментному описанию, приходящемуся на период отбора почвенных проб или позже. Более ранние обследования почв тех же самых угодий при оценке пространственной структуры почвенных показателей принимаются во внимание не достаточным образом. Между тем, наблюдения за динамикой показателей агрохимических показателей почвенного плодородия выступают неотъемлемой частью мониторинга почвенного плодородия [12, 13].

Цель исследований – оценка изменения пространственной структуры агрохимических свойств почв пахотной серой лесной почвы за многолетний период (1965–2021 годы) для совершенствования методологии мониторинга их плодородия.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли на пахотной серой лесной почве Арского государственного сортоиспытательного участка (ГСУ) Республики Татарстан (РТ), который находится в северо-западной части Предкамья РТ и занимает площадь около 83 га (~1340 м×620 м). Участок имеет прямоугольную форму и вытянут в северо-восточном направлении. Рельеф сортоиспытательного участка представлен слабопологим склоном. На участке распространены следующие почвы: дерново-слабоподзолистая слабосмытая тяжелосуглинистая (13,03 га),

дерново-слабоподзолистая слабосмытая слаборазмываемая тяжелосуглинистая (1,26 га), светло-серая лесная тяжелосуглинистая (67,34 га), светло-серая лесная слаборазмываемая тяжелосуглинистая (0,28 га), светло-серая лесная пестроцветная тяжелосуглинистая (0,97 га). В литологическом отношении зона сорто-испытательного участка расположена на отложениях казанского и татарского ярусов пермской системы.

Оценку изменения пространственной структуры содержания в почве гидролизуемого азота, подвижных форм фосфора и калия проводили на основе многолетних данных агрохимических обследований, которые были проведены в 1965, 1975, 1980, 1987, 2011 и 2021 годах. Содержание гидролизуемого азота не определяли лишь в 1965 году. Данные 1965–1987 годов получены в ходе почвенно-агрохимических обследований участка, выполненных сотрудниками кафедры почвоведения Казанского государственного университета, данные 2011 и 2021 годов получены лично авторами.

Отбор образцов почв во все годы проводили по традиционной схеме составления объединенной пробы при агрохимическом обследовании пахотных угодий, однако площадь элементарного участка, из которого отбирали пробы, уменьшили до 1,0...1,5 га. В пределах элементарных участков на глубину пахотного слоя с использованием ручного пробоотборника отбирали 20...40 единичных проб почв, из которых составляли объединенную пробу. В 1965, 1975 и 1980 годах количество объединенных проб составляло 48 ед., а в последующие годы их было 52 ед. В объединенных почвенных образцах проводили определение содержания гидролизуемого азота, подвижного фосфора и подвижного калия. Методы определения агрохимических свойств почв различались по годам. Так, в 1965 году содержание подвижного фосфора определяли по методу Труога, в последующие годы – по методу Кирсанова. Подвижный калий до 1987 года включительно определяли по методу Масловой, в последующие годы – по методу Кирсанова. Гидролизуемый азот в 1975–1987 годах определяли по методу Тюрина и Кононовой, в последующие годы – по методу Корнфилда.

Для приведения к единой шкале значений почвенных показателей, полученных разными методами, проводили их предварительную стандартизацию по следующей формуле:

$$z = \frac{x - \bar{X}}{S_x} \quad (1)$$

где:

x – выборочное значение почвенного показателя;

$\bar{X}$ – среднее значение;

S_x – стандартное отклонение.

Оценку пространственной структуры агрохимических показателей проводили на основе геостатистического анализа (анализа вариограмм). Вариограмма выступает методом геостатистики и позволяет определить изменение пространственной автокорреляции исследуемых показателей путем количественной оценки полудисперсии на заданном расстоянии между точками. Пространственная автокорреляция переменных в геостатистике выражается через значение полудисперсии (полувариации):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} Z(x_i + h) - Z(x_i)^2 \quad (2)$$

где:

$\gamma(h)$ – экспериментальное значение полудисперсии на интервале расстояний h ;

$N(h)$ – количество пар значений выборки в интервале расстояний h ;

$Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ – выборочные значения в двух точках, разделенных интервалом расстояний h [14].

Для оценки пространственной зависимости почвенных свойств использовали соотношение параметров вариограммы «нагетт/порог». Отношение наггета к порогу меньше 25% указывает на сильную пространственную зависимость, 25...75% и более 75%, соответственно, на умеренную и слабую пространственную зависимость [15].

Геостатистические методы основаны на использовании пространственных координат исследуемого показателя. Поскольку в случае агрохимического отбора проб не представляется возможным определить конкретное расположение точек опробования в пределах элементарного участка, то за пространственные координаты объединенной пробы принимали центральное положение каждого элементарного участка.

Статистическая обработка данных была проведена при использовании статистической среды R. Вариограммный анализ проводили посредством пакета gstat языка R.

Результаты и обсуждение. В 1975 году среднее содержание гидролизуемого азота на участке составляло 119 мг/кг, к 1980 г. – 109 мг/кг, а к 1987 году оно снижается до 85 мг/кг. То есть, в период 1975–1980 годов гидролизуемый азот на участке характеризуется очень высоким содержанием (согласно градации, принятой для использованного метода), в 1987 году содержание гидролизуемого азота относится к высокой градации. В 2011 году гидролизуемый азот имел низкое содержание (111 мг/кг), а через десять лет его содержание снизилось до 88 мг/кг, что относится к очень низкому содержанию (табл. 1). Разница в уровнях градаций содержания гидролизуемого азота объясняется разными методами, которые использовали для определения этого показателя.

Таблица 1 – Статистические параметры агрохимических показателей по годам, мг/кг

Показатель	Минимум	Максимум	Среднее	Размах	Коэффициент вариации, %
1965 год					
Азот гидролизующий	-	-	-	-	-
Фосфор подвижный	170	401	265	231	19
Калий подвижный	145	255	191	110	16
1975 год					
Азот гидролизующий	51	187	119	136	19
Фосфор подвижный	150	306	254	156	16
Калий подвижный	168	306	231	138	15
1980 год					
Азот гидролизующий	30	336	109	306	54
Фосфор подвижный	82	306	199	224	34
Калий подвижный	90	300	151	210	24
1987 год					
Азот гидролизующий	51	136	85	85	25
Фосфор подвижный	174	462	313	288	26
Калий подвижный	161	366	218	205	21
2011 год					
Азот гидролизующий	78	157	111	79	17
Фосфор подвижный	148	781	499	633	35
Калий подвижный	103	426	250	323	29
2021 год					
Азот гидролизующий	63	119	88	56	14
Фосфор подвижный	149	515	294	366	33
Калий подвижный	81	298	172	217	26

Подвижные формы фосфора в 1965 году составляли 265 мг/кг, что относится к высокому содержанию подвижных фосфатов [16]. За период с 1975 по 2011 годы содержание подвижного фосфора в основном относилось к очень высокому, лишь в 1980 году – к высокому и составляло 199 мг/кг. В остальные периоды исследования оно превышало 250 мг/кг. Наибольшее среднее содержание подвижного фосфора отмечено в 2011 году – 499 мг/кг.

Содержание подвижного калия в 1965 году характеризовалось как повышенное (191 мг/кг). К 1975 году оно изменяется на высокое, составляя 231 мг/кг. К 1980 году содержание подвижного калия снижается до 151 мг/кг и соответствует повышенной обеспеченности почв. В период с 1980 по 1987 годы оно снова становится высоким, а его среднее содержание изменяется от 151 до 218 мг/кг. К 2011 году сохраняется высокая обеспеченность подвижным калием – 250 мг/кг. Спустя 10 лет содержание подвижного калия на участке составляло 172 мг/кг, то есть оставалось высоким согласно градации уровня обеспеченности соответствующего

метода.

Коэффициент вариации подвижного фосфора в 1965 и 1975 годах составлял 19 и 16% соответственно (средняя вариабельность). В 1980 году вариабельность подвижного фосфора была сильной (34%), в 1987 году коэффициент вариации был равен 26% (средняя вариабельность). С 2011 по 2021 годы коэффициент вариации превышал 30%, что соответствовало сильной вариабельности показателя. Подвижные формы калия, в отличие от подвижного фосфора, показывали среднюю вариабельность за весь период исследований. Гидролизующий азот имел высокую вариабельность в 1980 году (коэффициент вариации >30%). Вне этого года исследования вариабельность гидролизующего азота была средней. Агрохимические свойства почв распределяются неоднородно как на указанном временном промежутке, так и в пространстве в пределах исследуемого участка.

Вариограммный анализ по годам исследований показал, что пространственная структура агрохимических свойств почв изменяется с течением времени (рис.1).

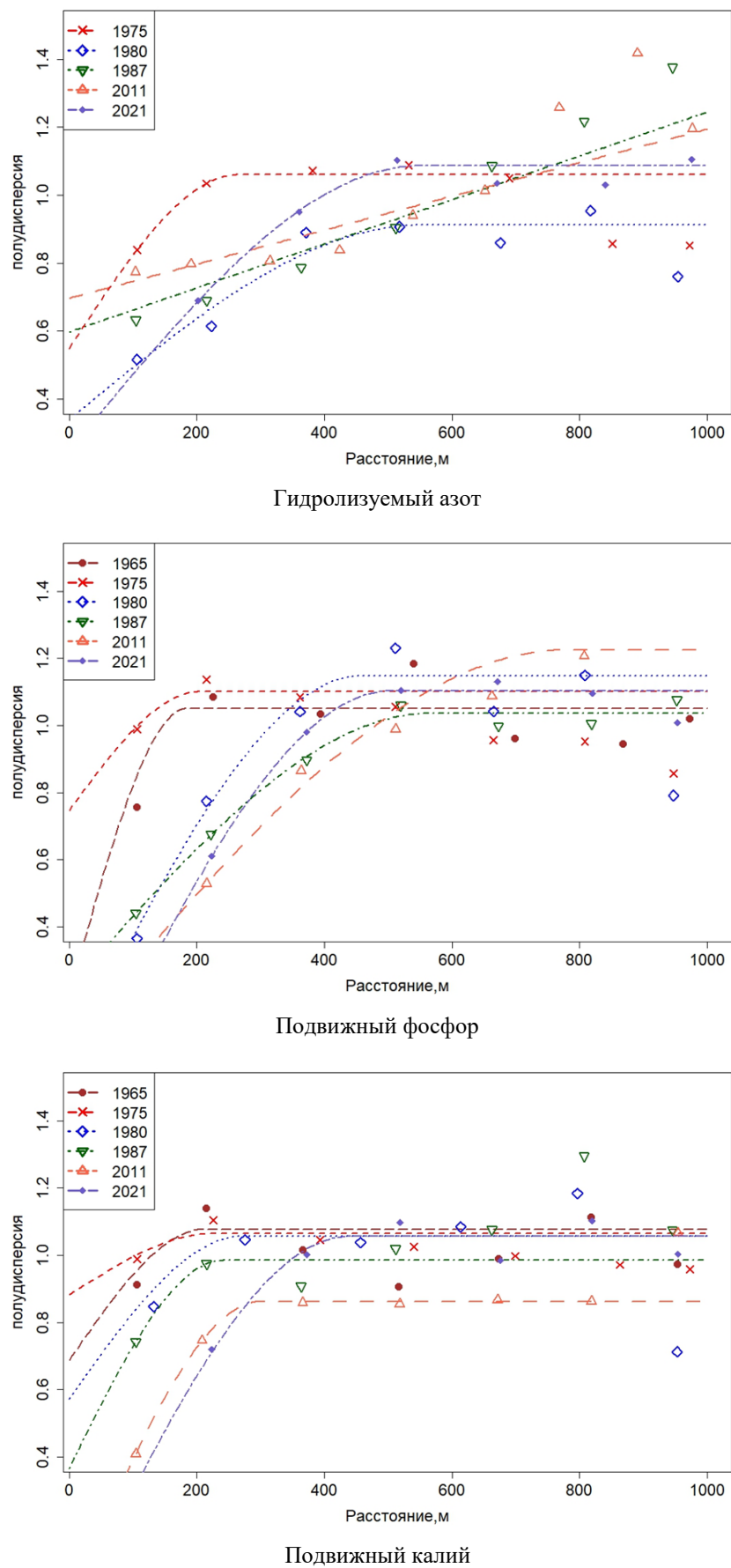


Рис. 1 – Вариограммы агрохимических свойств почв за период с 1965 по 2021 годы

Большинство из представленных вариограмм выступают изотропными, тем не менее, некоторые показатели в разные годы показывают наличие анизотропии в данных (табл. 2). К примеру, у подвижного фосфора анизотропия отмечена в 1965, 1987 и 2021 годах, для подвижного калия изменчивость со сменой направления в пространстве присутствует в 1975, 2011 и 2021 годах. Содержание гидролизующего азота показывает анизотропию в 1980 и 2021 годах. То есть, до 2021 года

анизотропия в исследуемых агрохимических свойствах проявлялась спорадически для отдельных показателей, тогда как в 2021 году она присутствует для всех агрохимических свойств. Преимущественное направление наибольшей изменчивости с течением времени может изменяться. Например, в 1965 и 1987 годах подвижный фосфор показывает анизотропию в северо-западном направлении (337), тогда как к 2021 году – в северо-восточном (30) (табл. 2).

Таблица 2 – Параметры вариограмм агрохимических показателей по годам

Элемент	Диапазон, м	Наггет (C ₀)	Частичный порог (C ₁)	Порог (C ₀ +C ₁)	C ₀ /(C ₀ +C ₁), %	Анизотропия	Пространственная зависимость*
1965 год							
Азот гидролизующий	-	-	-	-	-	-	-
Фосфор подвижный	185	0,19	0,86	1,05	18	337	С
Калий подвижный	213	0,69	0,39	1,08	64	-	У
1975 год							
Азот гидролизующий	266	0,55	0,51	1,06	52	-	У
Фосфор подвижный	205	0,75	0,35	1,10	68	-	У
Калий подвижный	225	0,88	0,18	1,06	83	160	Сл
1980 год							
Азот гидролизующий	552	0,34	0,57	0,91	37	35	У
Фосфор подвижный	459	0,00	1,15	1,15	0	-	С
Калий подвижный	271	0,57	0,49	1,06	54	-	У
1987 год							
Азот гидролизующий	тренд	0,60	4,10	4,69	13		С
Фосфор подвижный	568	0,22	0,82	1,04	21	335	С
Калий подвижный	241	0,36	0,62	0,99	37	-	У
2011 год							
Азот гидролизующий	тренд	0,70	2,07	2,76	25	-	С
Фосфор подвижный	778	0,06	1,17	1,23	5	-	С
Калий подвижный	302	0,00	0,91	0,91	0	55	С
2021 год							
Азот гидролизующий	550	0,25	0,84	1,09	23	90	С
Фосфор подвижный	504	0,00	1,30	1,30	0	30	С
Калий подвижный	439	0,00	1,14	1,14	0	45	С

* Сл – слабая, У – умеренная, С – сильная пространственная зависимость

Подвижные соединения фосфора в 1965 и 1975 годах имеют близкие значения диапазонов автокорреляции – 185 и 205 м соответственно. К 1980 году диапазон автокорреляции возрастает до 459 м. Самое дальнее расстояние автокорреляции подвижного фосфора отмечено в 2011 году, достигшее 778 м. В случае подвижного калия выявлено постепенное увеличение диапазона автокорреляции

с течением времени. Как и в случае с подвижным фосфором, в период 1965–1975 годов подвижный калий показывает близкие значения автокорреляции, составлявшие 213 и 225 м соответственно. Аналогичная картина отмечена в период 1980–1987 годов, когда диапазон автокорреляции снижается незначительно с 271 до 241 м. В период с 2011 по 2021 годов прирост диапазона автокорреляции

подвижного калия составляет около 140 м. Максимальное расстояние, на котором происходит взаимная корреляция значений подвижного калия, приходится на 2021 год и соответствует 439 м.

Для гидролизуемого азота пространственная структура не показывает однозначную картину в разные годы. В 1975 году диапазон автокорреляции гидролизуемого азота составлял 266 м, тогда как в 1980 году этот параметр вариограмм превышал предыдущее в 2 раза и составлял 552 м. В 1987 и в 2011 годах вариограммы гидролизуемого азота показывали наличие тренда, характеризующего рост значения полудисперсии вариограммы. Считается, что тренд в пространственных данных возникает в случае изменения среднего значения исследуемой переменной под действием глобального процесса, либо в случае наличия процесса, который происходит в большем масштабе, чем исследуемая площадь [17]. В нашем случае наличие тренда в пространственной структуре гидролизуемого азота может быть связано с множеством факторов, среди которых следует отметить внесение органических и минеральных удобрений при их неравномерном усвоении сельскохозяйственной растительностью. В целом, для анализа пространственных закономерностей форм азота следует принимать во внимание климатические характеристики исследуемых участков, биологические особенности почвенного покрова, а также уровень применяемых на участке средств химизации. В подтверждение того, что тренд в пространственных данных содержания гидролизуемого этой формы азота в пределах участка, можно привести вариограмму величины этого показателя для 2021 года. На ней видно, что теряется тренд, а диапазон пространственной автокорреляции возвращается в значение, равное 550 м, что вполне сопоставимо с диапазоном автокорреляции гидролизуемого азота в 1980 году. В отличие от подвижных форм фосфора и калия, пространственная структура которых изменяется продолжительное время, гидролизуемый азот показывает значительные перемены в пространственной структуре в пределах исследуемого участка, которые обусловлены уровнем химизации, развитием сельскохозяйственной растительности и условиями окружающей среды, приводящими к трансформации азотистых соединений.

Соотношение «нагетт/порог» показывает, что гидролизуемый азот до 1980 года имеет умеренную пространственную зависимость, после 1980 года она становится сильной. Пространственная зависимость подвижного фосфора сильная во все периоды обследования, за исключением 1975 года, когда она снижается до умеренной. В случае подвижного калия в 1965 году отмечена умеренная пространственная зависимость, которая к 1975 году изменяется на слабую. В период с 1980 по 1987 годы для подвижного калия

пространственная зависимость умеренная, тогда как после 1987 года соотношение «нагетт/порог» находится на уровне менее 25%, что соответствует сильной пространственной зависимости. Отмечено, что умеренная пространственная зависимость выступает результатом взаимодействия между внутренними (процессы формирования почвы) и внешними (удобрение почвы и приемы возделывания) факторами, тогда как, как правило, сильная пространственная зависимость свойств почв связана в большей степени с внутренними факторами [15, 18, 19]. Слабая же пространственная зависимость связана более всего со случайными внешними факторами, такими как вспашка или применение агрохимикатов.

Изменение пространственной зависимости агрохимических показателей связано с проводимыми на участке агротехническими мероприятиями и уровнем земледелия. В 1965–1975 годах на участке применяли повышенные дозы удобрений, что, вероятно, привело к насыщению пашни элементами питания, и смещению уровня пространственной зависимости подвижного фосфора и, прежде всего, подвижного калия. Аналогичное поведение отмечено в работе [20], где пространственная зависимость подвижного калия изменилась с сильной на умеренную вследствие применения удобрений. Туры агрохимического обследования пахотных почв Республики Татарстан показывают неоднородную картину по обеспеченности почв подвижными формами фосфора и калия. К примеру, в пахотных черноземах Буинского района Республики Татарстан за 1970–2017 годы доля подвижного фосфора возросла с 4,0 до 6,0% от его валовых запасов [21]. В целом, в пахотных почвах Республики Татарстан, начиная с 1965 года, средневзвешенное содержание подвижного фосфора возрастает, а положительный баланс этого элемента устанавливается в период 1971–1995 годов [22]. Средневзвешенное содержание подвижного калия в пахотных почвах Предволжья Республики Татарстан за 1965–2020 года менялось скачкообразно (от 116 до 161 мг/кг), при этом интенсивность применения агрохимикатов оказала слабое влияние на динамику этого показателя [23].

В 2011–2021 годах, которые приходятся на период относительного спада интенсивности химизации [24, 25, 26], уровень пространственной зависимости всех исследуемых показателей в почвах Арского ГСУ оказался в стороне сильной градации. То есть, непрерывная сельскохозяйственная деятельность, а также уровень химизации и агротехники определили развитие пространственной неоднородности на исследуемом участке в разные периоды времени.

В целом исследования изменения пространственной структуры агрохимических свойств почвы в разные периоды времени на одних и тех же участках малочисленны.

Например, в холмистом регионе Китая была исследована пространственно-временная изменчивость агрохимических свойств почв для обследования 1985 и 1997 годов. Геоestatистический анализ показал, что все свойства почвы между этими годами были пространственно структурированы [21]. В работе [27] исследовали изменение с 1980 по 2017 годы доступных соединений азота, фосфора и калия в почвах сельскохозяйственных угодий Китая и определили пространственную структуру, а также пространственно-временные изменения между содержанием доступного азота и фосфора. Исследование пространственно-временных изменений агрохимических свойств почв определяет наличие равновесия между ростом агропроизводства, рационального природопользования и обеспечения продовольственной безопасности.

Выводы. За почти 60-летний (для гидролизуемого азота – 50-летний) период возделывания сельскохозяйственных культур проведена оценка изменения пространственной структуры доступных для растений соединений азота, фосфора и калия в почвах сортоиспытательного участка. Внутрипольная вариабельность агрохимических показателей за период обследования существенно изменилась. Пространственное распределение содержания всех доступных элементов питания в разные годы

характеризуется анизотропией, которая в ряде случаев изменяла свое направление с течением времени. Также с годами происходило увеличение диапазона автокорреляции содержания подвижных фосфора и калия. Диапазон автокорреляции гидролизуемого азота вырос с 266 м в 1975 году до 550 м в 2021 году, но этот показатель характеризуется ярко выраженными пространственными трендами в данных 1987 и 2011 годов. В целом, в зависимости от уровня интенсификации земледелия происходит изменение пространственной структуры внутрипольной вариабельности агрохимических свойств почв, а также увеличение степени их пространственно-временной неоднородности.

Сведения об источнике финансирования. 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.

Литература

1. Самсонова В. П., Кротов Д. Г., Лавринова Е. Ю. Пространственная изменчивость агрохимических свойств сельскохозяйственных угодий Брянской области // *Агрохимия*. 2017. № 7. С. 11–18.
2. Белоусова Е. Н., Белоусов А. А., Ульянова О. А. Оценка пространственной изменчивости агрохимических свойств агросерой почвы при планировании полевого опыта с минеральными удобрениями // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2024. №3. С. 5–12.
3. Мудрых Н. М., Самофалова И. А. Моделирование пространственной изменчивости агрохимических показателей почв в агроландшафтах Нечерноземья // *Агрохимический вестник*. 2019. № 5. С.17–24.
4. Беленков А. И., Мазиров М. А., Воронов М. А. Результаты научного и практического освоения точного земледелия в полевом опыте // *Плодородие*. 2025. №1. С. 31–41.
5. Клебанович Н. В., Киндеев А. Л., Сазонов А. А. Геоestatистический анализ при картографировании пространственной неоднородности влажности и кислотности почв // *Геосферные исследования*. 2021. № 3. С. 80–91.
6. Кузякова И. Ф., Романенков В. А., Кузяков Я. В. Метод геоestatистики в почвенно-агрохимических исследованиях // *Почвоведение*. 2001. № 9. С. 1132–1139.
7. Выбор метода геоestatистической интерполяции свойств почв государственных сортоиспытательных участков при использовании параметров цифровой модели рельефа / И. А. Сахабиев, С. С. Рязанов, Т. Г. Кольцова и др. // *Почвоведение*. 2018. №3. С. 259–273.
8. Identifying hidden factors influencing soil Olsen-P in an alkaline calcareous soil using machine learning and geostatistical techniques / M. Bouray, M. Bayad, A. Beniaich, et al. // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. No. 21. P. e40128. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024161592> (дата обращения: 02.05.2025).
9. Heuvelink G. B., Webster R., Spatial statistics and soil mapping: a blossoming partnership under pressure // *Spatial statistics*. 2022. Vol. 50. P. 100639. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211675322000264> (дата обращения: 02.05.2025).
10. Сахабиев И.А. Рязанов С.С. Исследование пространственной изменчивости свойств почв с использованием геоestatистического подхода // *Российский журнал прикладной экологии*. 2015. № 2. С. 32–37.
11. Киндеев А. Л. Перспективные направления геоestatистического анализа и стохастического моделирования с учетом экономических издержек при точном земледелии // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. 2022. № 2. С. 59–70.
12. Лукин С. В. Многолетняя динамика плодородия пахотных почв Белгородской области // *Агрохимический вестник*. 2013. № 4. С. 54–56.
13. Суринов А. В. Динамика плодородия пахотных черноземов лесостепной зоны Центрально-Черноземных областей России // *Вестник Казанского ГАУ*. 2021. № 1 (61). С. 57–61.
14. Oliver M.A., Webster R. Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging. Springer. 2015. 100 p.
15. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils / C. Cambardella, T. Moorman, J. Novak, et al. // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1994. Vol. 58. P. 1501–1511.
16. Гинзбург К. Е. Методы определения фосфора в почве // *Агрохимические методы исследования почв*.

М.: Наука. 1975. С. 106–187.

17. Overmars K. P., de Koning G. H. J., Veldkamp A. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models // *Ecological Modelling*. 2003. Vol. 164. P. 257–270.

18. Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management / D. Vasu, S. Singh, N. Sahu, et al. // *Soil Till. Res.* 2017. Vol. 169. P. 25–34.

19. Tillage Management Impacts on Soil Phosphorus Variability under Maize–Soybean Rotation in Eastern Canada / J. D. Nze Memiaghe, A. N. Cambouris, N. Ziadi, et al. // *Soil Syst.* 2022. Vol. 6 (2). P. 2–20.

20. Sun B., Zhou S., Zhao Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China // *Geoderma*. 2003. Vol. 115. No. 1–2, P. 85–99.

21. Лукманов А. А. Оценка вклада факторов в почвенный фонд фосфора в лесостепных черноземах Республики Татарстан // *Агрохимический вестник*. 2019. № 5. С. 3–7.

22. Лукманов А. А., Нуриев С. Ш., Давлятин И. Д. Состояние плодородия пахотных почв Республики Татарстан и урожайность сельскохозяйственных культур // *Плодородие*. 2010. № 2. С. 6–8.

23. Агрохимические факторы интенсификации земледелия и калийный режим почв Предволжья Республики Татарстан / А. А. Лукманов, М. Ю. Гилязов, Р. М. Гайнуллин и др. // *Агрохимический вестник*. 2025. №1. С. 44–49.

24. Динамика плодородия почв Республики Татарстан / П. А. Чекмарев, А. А. Лукманов, С. Ш. Нуриев и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2014. № 4. С. 6–9.

25. Гилязов М. Ю., Лукманов А. А., Зарипов Д. Ф. Уровень применения агрохимикатов и фосфатный режим пахотных почв Предволжья Республики Татарстан // *Агробиотехнологии и цифровое земледелие*. 2024. Т. 3. № 4. С. 18–24.

26. Известкование кислых почв в Республике Татарстан / А. А. Лукманов, К. В. Владимиров, А. А. Валиев и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. №9. С. 15–18.

27. Effects of long-term cultivation on spatial-temporal variation of soil nitrogen and phosphorus: a case study in Shaanxi Province, China / J. Cao, Y. Chen, H. Wang, et al. // *Environ Monit Assess.* 2023. Vol. 195. No. 1439. P. 1–13. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-023-12038-3> (дата обращения: 02.05.2025).

Сведения об авторах:

Сахабиев Ильназ Алимович – кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения имени И. В. Тюрина, e-mail: IlInASahabiev@kpfu.ru

Институт экологии, биотехнологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, Казань, Россия

Гаффарова Лилия Габдулбаровна – кандидат биологических наук, доцент кафедры агрохимии и почвоведения, e-mail: gaffarovalylya@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

Гиниятуллин Камиль Гашикович – кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения имени И. В. Тюрина, e-mail: giniyatullin@mail.ru

Смирнова Елена Васильевна – кандидат биологических наук, доцент, зав. кафедрой почвоведения имени И. В. Тюрина, e-mail: elenavsmirnova@mail.ru

Институт экологии, биотехнологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, Казань, Россия

PATTERNS OF CHANGES IN THE SPATIAL STRUCTURE OF AGROCHEMICAL PROPERTIES OF ARABLE LIGHT GRAY FOREST SOIL DURING LONG-TERM OBSERVATIONS

I. A. Sakhabiev, L. G. Gaffarova, K. G. Giniyatullin, E. V. Smirnova

Abstract. The studies were conducted to assess changes in the spatial structure of mobile forms of nitrogen, phosphorus and potassium in the arable layer of light gray forest soil in the Republic of Tatarstan from 1965 to 2021. Long-term data from agrochemical surveys were processed using the method of geostatistical variogram analysis, reflecting changes in the variance of indicators with distance. Over the course of almost 60 years, there has been a noticeable change not only in the content of mobile forms of nutrients, but also in their spatial structure. The autocorrelation ranges (the distance of maximum similarity of the indicator in space) of mobile phosphorus in 1965 and 1975 were 185 and 205 m, respectively. By 1980, the value of this indicator increased to 459 m, and in 2011 it reached a maximum (778 m). The autocorrelation range of mobile potassium increased from 213 m (1965) to 439 m (2021), hydrolyzable nitrogen - from 266 m (1975) to 550 m (2021). Variograms of hydrolyzable nitrogen in 1987 and 2011 indicate a regular change in space (spatial trend). The ratio of variogram elements (nugget/sill), which is used to estimate the spatial dependence of the indicator (the mutual influence of the indicator based on its location in space), made it possible to conduct a comparative analysis of the spatial structure of the studied properties over time. For hydrolyzable nitrogen, the spatial dependence was moderate from 1975 to 1980 (nugget/sill within 25...75%), and strong from 1987 to 2011 (nugget/sill <25%). For mobile phosphorus, it was predominantly strong, with the exception of 1975 (moderate), and for mobile potassium - weak in 1975 (>75%), and moderate in 1965, 1980 and 1987. Compared to hydrolyzable nitrogen, mobile forms of phosphorus and potassium are characterized by a more stable spatial structure, but a tendency to increase the autocorrelation range is noted.

Key words: agrochemical properties of soils, spatiotemporal heterogeneity, variogram analysis, geostatistical analysis, long-term data, soil fertility.

References

1. Samsonova VP, Krotov DG, Lavrinova EYu. [Spatial variability of agrochemical properties of agricultural lands in Bryansk region]. *Agrokhimiya*. 2017; 7. 11–18 p.

2. Belousova EN, Belousov AA, Ulyanova OA. [Assessment of spatial variability of agrochemical properties of agrogray soil when planning a field experiment with mineral fertilizers]. *Vestnik NGAU (Novosibirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet)*. 2024; 3. 5–12 p.

3. Mudrykh NM, Samofalova IA. [Modeling of spatial variability of agrochemical parameters of soils in agrolandscapes of the Non-Black earth region]. *Agrokhimicheskiy vestnik*. 2019; 5. 17–24 p.

4. Belenkov AI, Mazirov MA, Voronov MA. [Results of scientific and practical development of precision farming in a field experiment]. *Plodородие*. 2025; 1. 31–41 p.

5. Klebanovich NV, Kindeev AL, Sazonov AA. [Geostatistical analysis in mapping the spatial heterogeneity of soil

- moisture and acidity]. *Geosfernye issledovaniya*. 2021; 3. 80-91 p.
6. Kuzyakova IF, Romanenkov VA, Kuzyakov YaV. [The geostatistics method in soil-agrochemical studies]. *Pochvovedenie*. 2001; 9. 1132-1139 p.
 7. Sakhabiev IA, Ryazanov SS, Koltsova TG. [Selecting a method for geostatistical interpolation of soil properties in state variety testing sites using digital elevation model parameters]. *Pochvovedenie*. 2018; 3. 259-273 p.
 8. Bouray M, Bayad M, Beniaich A. Identifying hidden factors influencing soil Olsen-P in an alkaline calcareous soil using machine learning and geostatistical techniques. [Internet]. *Heliyon*. 2024; Vol.10. No.21. e40128 p. [cited 2025, May 02]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024161592>.
 9. Heuvelink GB, Webster R. Spatial statistics and soil mapping: a blossoming partnership under pressure. [Internet]. *Spatial statistics*. 2022; Vol.50. 100639 p. [cited 2025, May 02]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211675322000264>.
 10. Sakhabiev IA, Ryazanov SS. [Study of spatial variability of soil properties using a geostatistical approach]. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 2015; 2. 32-37 p.
 11. Kindeev AL. [Promising directions of geostatistical analysis and stochastic modeling taking into account economic costs in precision farming]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie*. 2022; 2. 59-70 p.
 12. Lukin SV. [Long-term dynamics of arable soil fertility in Belgorod region]. *Agrokhimicheskiy vestnik*. 2013; 4. 54-56 p.
 13. Surinov AV. [Dynamics of fertility of arable chernozems in the forest-steppe zone of the Central Black Earth regions of Russia]. *Vestnik Kazanskogo GAU*. 2021; 1 (61). 57-61 p.
 14. Oliver MA, Webster R. Basic steps in geostatistics: the variogram and kriging. Springer. 2015; 100 p.
 15. Cambardella C, Moorman T, Novak J. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1994; Vol.58. 1501-1511 p.
 16. Ginzburg KE. [Methods for determining phosphorus in soils]. *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv*. Moscow: Nauka. 1975; 106-187 p.
 17. Overmars KP, de Koning GHJ, Veldkamp A. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models. *Ecological Modelling*. 2003; Vol.164. 257-270 p.
 18. Vasu D, Singh S, Sahu N. Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management. *Soil Till. Res*. 2017; Vol.169. 25-34 p.
 19. Nze Memiaghe JD, Cambouris AN, Ziadi N. Tillage management impacts on soil phosphorus variability under maize-soybean rotation in Eastern Canada. *Soil Syst*. 2022; Vol.6 (2). 2-20 p.
 20. Sun B, Zhou S, Zhao Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*. 2003; Vol.115. No.1-2. 85-99 p.
 21. Lukmanov AA. [Assessment of the contribution of factors to the soil phosphorus fund in forest-steppe chernozems of the Republic of Tatarstan]. *Agrokhimicheskiy vestnik*. 2019; 5. 3-7 p.
 22. Lukmanov AA, Nuriev SSh, Davlyatshin ID. [The state of arable soils fertility of the Republic of Tatarstan and the yield of agricultural crops]. *Plodorodie*. 2010; 2. 6-8 p.
 23. Lukmanov AA, Gilyazov MYu, Gaynullin RM. [Agrochemical factors of agriculture intensification and potassium regime of soils in Volga region of the Republic of Tatarstan]. *Agrokhimicheskiy vestnik*. 2025; 1. 44-49 p.
 24. Chekmarev PA, Lukmanov AA, Nuriev SSh. [Dynamics of soil fertility in the Republic of Tatarstan]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2014; 4. 6-9 p.
 25. Gilyazov MYu, Lukmanov AA, Zaripov DF. [Agrochemicals application level and phosphate regime of arable soils in Volga region of the Republic of Tatarstan]. *Agrobiotekhnologii i tsifrovoye zemledelie*. 2024; Vol.3. 4. 18-24 p.
 26. Lukmanov AA, Vladimirov KV, Valiev AA. [Liming of acidic soils in the Republic of Tatarstan]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2021; 9. 15-18 p.
 27. Cao J, Chen Y, Wang H. Effects of long-term cultivation on spatial-temporal variation of soil nitrogen and phosphorus: a case study in Shaanxi Province, China. [Internet]. *Environ Monit Assess*. 2023; Vol.195. No.1439. 1-13 p. [cited 2025, May 02]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-023-12038-3>.

Authors:

Sakhabiev Ilnaz Alimovich – Ph.D. of Biological Sciences, Associate Professor of Soil Science Department named after I.V. Tyurin, e-mail: IlnASakhabiev@kpfu.ru
 Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia
 Gaffarova Liliya Gabdulbarovna – Ph.D. of Biological Sciences, Associate Professor of Agrochemistry and Soil Science Department, e-mail: gaffarovalylya@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia
 Giniyatullin Kamil Gashikovich – Ph.D. of Biological Sciences, Associate Professor of Soil Science Department named after I.V. Tyurin, e-mail: giniyatullin@mail.ru
 Smirnova Elena Vasilevna – Ph.D. of Biological Sciences, Associate Professor, Head of Soil Science Department named after I.V. Tyurin, e-mail: elenavsmirnova@mail.ru
 Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia.