

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

САХАБИЕВ ИЛЬНАЗ АЛИМОВИЧ

**ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
НЕОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ ПОЧВ ТЕРРИТОРИЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ
ДВУХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СОРТОИСПЫТАТЕЛЬНЫХ
УЧАСТКОВ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН)**

Специальность 1.5.19 (03.02.13) – Почвоведение (биологические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель -
кандидат биологических наук, доцент
Гиниятуллин Камиль Гашикович

Москва– 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ.....	11
1.1 Теоретическая и методологическая основа цифрового почвенного картографирования.....	14
1.2 Исследование пространственной неоднородности почвенных свойств с помощью геостатистических методов.....	21
1.3 Показатели окружающей среды, используемые для моделирования пространственной неоднородности почвенных свойств.....	32
1.4 Морфометрические характеристики рельефа как компоненты цифрового почвенного картографирования.....	38
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	40
2.1 Почвенно-геоморфолого-геологическая характеристика государственных сортоиспытательных участков.....	40
2.2 Морфометрические характеристики рельефа.....	46
2.3 Статистические методы исследования.....	50
ГЛАВА 3. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ.....	60
3.1 Морфологическое описание почв государственных сортоиспытательных участков.....	60
3.2 Изменение физико-химических свойств почв по профилю.....	66
3.3 Описательная статистика пространственных данных.....	71
3.4 Оценка пространственных структур почвенных свойств.....	77
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬЕФА НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ.....	89
4.1. Моделирование зависимости свойств почв от характеристик рельефа.....	89

4.2. Пространственный прогноз на основе характеристик рельефа и оценка точности прогноза.....	100
--	-----

ГЛАВА 5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ РАЗНОВРЕМЕННЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ.....	110
--	-----

5.1 Сопоставление результатов агрохимических обследований.....	110
--	-----

5.2 Сравнение пространственных структур и пространственная интерполяция почвенных свойств.....	113
---	-----

5.3 Кластеризация интерполированных карт.....	127
---	-----

ВЫВОДЫ.....	140
-------------	-----

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
------------------------	-----

ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	164
-------------------	-----

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	165
-------------------	-----

ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	169
-------------------	-----

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	173
-------------------	-----

ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	177
-------------------	-----

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Непрекращающееся интенсивное использование почв существенно изменяет качественное состояние почвенного покрова ландшафтов. Своевременная диагностика изменения почвенного покрова и, в частности, снижения почвенного плодородия, является одной из актуальнейших задач для почвенно-охранной деятельности и рационального природопользования. Оптимальное использование всего набора мероприятий, направленных на охрану почв, возможно лишь при получении достоверных и точных знаний о состоянии почвенного покрова по всей области исследования. В тоже время широкое внедрение технологий цифрового земледелия требует своевременного получения недорогой, высокоточной информации о пространственном распространении свойств почв. К примеру, сельскохозяйственным производителям необходимо знать точное содержание элементов питания на агропроизводственных участках для получения качественных урожаев при минимизации затрат на внесение удобрений и, как следствие, устойчивого развития сельскохозяйственных территорий. Однако неоднородность почвенного покрова и пространственная вариабельность свойств почв вносят неопределенность в оценки пространственного распределения почвенных свойств. К естественной неоднородности почвенного покрова в условиях интенсивного сельскохозяйственного использования накладывается и неоднородность антропогенного характера. Получение информации о пространственном распределении почвенных свойств является актуальным в данном аспекте. Достичь высокого уровня производства качественной сельскохозяйственной продукции с минимальным ущербом для агроландшафтов возможно лишь при использовании карт почв и почвенных свойств, обладающих высокой точностью. При всем этом картографирование на уровне полей является достаточно редким (Савин, 2016). Таким образом, более глубокое понимание распределений почвенных свойств необходимо при оценке текущей или

потенциальной продуктивности почв и определении потенциальных мер по защите окружающей среды.

Государственные сортоиспытательные участки (ГСУ) представляют собой благоприятный вариант для исследования, поскольку всегда располагаются на типичных участках, характеризующих конкретный почвенно-агроэкологический район. К тому же ГСУ на протяжении многих десятков лет находятся под постоянным антропогенным воздействием в виде сельскохозяйственной деятельности, включающей в себя изучение, оценку сортов и гибридов сельскохозяйственных культур.

Традиционные методы обследования почв в прошлом подвергались критике за то, что они имели слишком качественный характер (McBratney et al., 2000; Neuvelink et al., 2001). В ответ на эту критику разрабатывались количественные модели, которые используются для описания, классификации и изучения пространственных структур распределения почв и их свойств в более объективном выражении. На сегодняшний день почвоведение достигло такого этапа развития, когда традиционные методы обследования почв могут быть дополнены количественными моделями и алгоритмами, которые используются для описания, классификации и изучения пространственных структур распределения почв и их свойств.

Методы современного цифрового почвенного картографирования, основываясь на такие модели, позволяют производить карты исследуемых почвенных свойств с большей точностью и статистически значимой достоверностью. Использование этих методов позволяет исследовать локальные пространственные структуры свойств почв, благодаря чему, при производстве карт учитывается неоднородность почв и почвенных показателей.

Цель заключается в том, чтобы с помощью методов цифровой почвенной картографии на примере двух сортоиспытательных участков Республики Татарстан, находящихся в различных почвенно-геоморфологических условиях, провести оценку, сравнение

пространственной неоднородности и картографирование содержания агрохимических показателей почв, определенных в разное время и разными методами.

Задачи исследования:

1. Провести оценку пространственной неоднородности агрохимических свойств почв и содержания физической глины на примере двух ГСУ Республики Татарстан.
2. Построить модели пространственного прогноза неоднородности агрохимических свойств почв и содержания физической глины, основанные на описании их детерминированной и стохастической частей.
3. Оценить влияние рельефа на пространственное распределение агрохимических свойств почв и содержания физической глины.
4. Сравнить пространственное распределение агрохимических свойств почв, полученных в результате почвенно-агрохимических обследований, проведенных с разницей в 25 лет на одних и тех же элементарных участках пробоотбора.

Научная новизна

1. Разработан алгоритм построения детальных агрохимических карт, включающий использование вариограммного анализа оригинальных и стандартизированных переменных, моделирование с помощью регрессионного кригинга с множественной линейной регрессией на оригинальных переменных и на главных компонентах, выбор наилучших моделей и оценку их точности, кластеризацию на основе критериев нечеткой логики и сравнение цифровых карт. **Алгоритм апробирован для построения карт агрохимических свойств пахотного горизонта двух участков государственной сортоиспытательной сети Республики Татарстан с отличающимся почвенным покровом и рельефом, на которых применялась научно-обоснованная агротехника и методика опытного дела, направленные на минимизацию неоднородности почвенных свойств.**

2. На примере двух контрастных в почвенном отношении участков, соизмеримых с размерами единичного угодья, **впервые выявлено**, что за 25 лет непрерывного сельскохозяйственного использования пространственные структуры агрохимических свойств почв не претерпевают значительных изменений, однако со временем влияние рельефа на пространственное распределение некоторых агрохимических свойств почв может возрастать.

3. **Количественно оценено** влияние морфометрических характеристик рельефа на пространственное распределение агрохимических показателей почв и физической глины в условиях Западного Предкамья и Восточного Закамья. Оказалось, что на участке с бóльшим перепадом высот (Заинский ГСУ) почвенные свойства на 23 – 54 % определяются рельефом, а на участке с меньшим перепадом высот (Арский ГСУ) – на 13 – 40%.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в том, что в ходе исследования достоверно определяются статически значимые параметры, оказывающие влияние на пространственное распределение свойств почв, устанавливаются закономерности пространственного распределения почвенных свойств в масштабе поля и оценивается детерминированная и стохастическая составляющая пространственной неоднородности основных физико-химических свойств почв территории ГСУ.

Практическая значимость работы выражается в том, что результаты исследований могут быть использованы в качестве методического основания для описания пространственной неоднородности свойств почв на территориях сельскохозяйственного назначения в масштабе поля. Результаты могут быть использованы как в целях точного земледелия, так и в качестве основы климатически оптимизированных технологий в сельском хозяйстве (Sahabiev et al., 2018).

Положения, выносимые на защиту

1. Для построения детальных агрохимических карт предлагается разработанный алгоритм, включающий использование вариограммного

анализа оригинальных и стандартизированных переменных, моделирование с помощью регрессионного кригинга с множественной линейной регрессией на оригинальных переменных и на главных компонентах, выбор наилучших моделей и оценку их точности, кластеризацию на основе критериев нечеткой логики и сравнение цифровых карт.

2. Сравнение пространственных структур агрохимических свойств почв, определенных разными методами и в разное время, может быть реализовано при использовании специального инструмента – стандартизированных вариограмм.

3. Использование морфометрических характеристик рельефа при цифровом картографировании в детальном масштабе, таких как, экспозиция склона, степень плоскостности водоразделов и низин, кривизна поверхности и другие, улучшает до 15% описание пространственной неоднородности агрохимических свойств почв и содержания физической глины на сортоучастке с бóльшим перепадом высот (Заинский ГСУ). При меньшем перепаде высот (Арский ГСУ) при использовании индекса расчленённости и других морфометрических характеристик улучшение достигает до 7%.

4. Пространственная структура агрохимических показателей почв двух сортоучастков в период с 1987 года по 2011 год изменилась незначительно, но возросло влияние рельефа на пространственное распределение содержания гумуса, фосфора и кислотности.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов основана на репрезентативности выборки, применении методов статистического анализа и моделирования, оценки точности моделей. Результаты были представлены на научных конференциях молодых ученых Института проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (Казань, 2015 и 2016), XIX Докучаевских молодежных чтениях (Санкт-Петербург, 2016), VII съезде Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с международным участием научной конференции «Почвоведение-продовольственной и экологической

безопасности страны» (Белгород, 2016 г.), научной конференции «Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования» (Воронеж, 2017), III международной научной конференции «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века» (Казань, 2017), международной научной конференции «Агрохимическое обеспечение цифрового земледелия» (Москва, 2019), IV молодежных Вильямсовских чтениях «Генетическая и агрономическая оценка почв» (Москва, 2019), международной научно-практической конференции «Сельское хозяйство и продовольственная безопасность: технологии, инновации, рынки, кадры» (Казань, 2019).

Публикации

По результатам исследования опубликована 21 работа, из них 4 статьи, индексируемые в Web of Science и Scopus; 4 статьи в журналах списка RSCI Web of Science; 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК. По результатам работы зарегистрировано 2 базы данных.

Личный вклад автора

Автор обобщил данные из литературных источников, участвовал в полевых экспедициях, провел большую часть лабораторных работ, статистический анализ данных, построение пространственных моделей и оценку их точности, работу с цифровой моделью рельефа земной поверхности. Автором самостоятельно проведено обобщение и интерпретация полученных результатов. В работах [3-6], написанных в соавторстве, автором внесен основополагающий вклад. В работах [1, 2, 7, 9] вклад автора составляет более половины, в работе [8] 0,16 п.л. из 0,46 п.л., в работе [10] – 0,22 п.л. из 1,11 п.л.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 180 страницах, содержит 26 таблиц и 26 рисунков, 5 приложений (на 17 страницах). Список литературы включает 196 наименования, в том числе 114 на иностранном языке.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю к.б.н. Гиниятуллину К.Г., а также к.б.н. Григорьяну Б.Р. за помощь и поддержку при выполнении диссертационной работы, сотрудникам кафедры почвоведения Казанского федерального университета (КФУ) за возможность проведения работы и ценные советы, сотрудникам лаборатории экологии почв Института проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (ИПЭН АН РТ) за помощь, оказанную на разных этапах работы. Автор выражает отдельную благодарность д.б.н., профессору кафедры моделирования экологических систем (КФУ) Савельеву А.А. за ознакомление с современными статистическими методами исследования и анализа данных. Автор признателен своей семье и друзьям за моральную поддержку и помощь в работе.

Исследование выполнено при поддержке молодежного научного гранта АН РТ № 11-104-ф Г 2016, частично гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-29-05061-мк.

ГЛАВА 1. ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ

Одним из значимых направлений современного почвоведения является почвенная картография, которая в настоящий момент переживает трансформацию, заключающуюся в переходе от традиционных методов к методам цифрового картографирования и компьютерного моделирования.

Это направление предполагает создание цифровых карт, которые предсказывают почвы и их свойства на основе факторов почвообразования (Хитров, 2012). Цифровое картографирование почв (Digital soil mapping) стало успешной суб-дисциплиной почвоведения (Minasny et al., 2016). Бурное развитие информационных технологий и все большая доступность методов компьютерного моделирования за короткий период дали значительный толчок к лавинообразно увеличивающемуся количеству публикуемых статей по цифровому картографированию почв. В настоящее время число работ по цифровому картографированию стремительно увеличивается, а количество цитирований растет на 384 цитирования ежегодно (рис. 1) (Minasny et al., 2016).

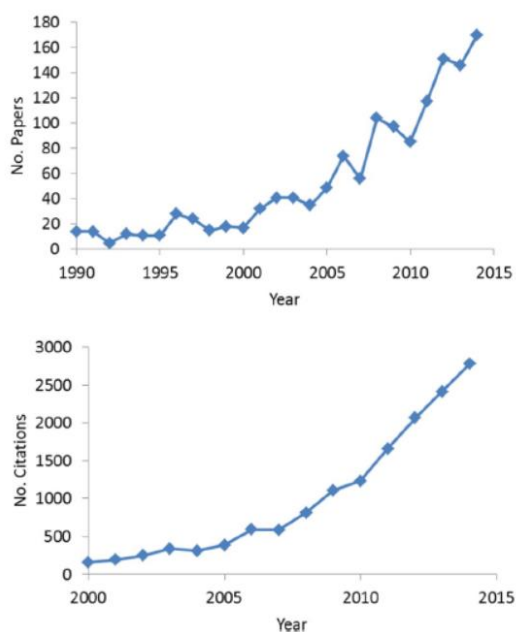


Рисунок 1. Количество документов и количество цитирований из поиска по ключевым словам «цифровой», «почвы», «картографирование» из базы данных Scopus (Minasny et al., 2016).

Традиционные методы обследования почв в прошлом подвергались критике за то, что они имели слишком качественный характер (McBratney et al., 2000). Большинство доступных на сегодня почвенных карт были созданы вручную рисованием на бумаге как непосредственных почвенных контуров (Общесоюзная инструкция..., 1973), так и генерализованных почвенных контуров (Руководство по среднемасштабному..., 2008). Позже многие из этих карт были оцифрованы в различные форматы геоинформационных систем (ГИС), но они сохраняют ограничения соответствующего источника карт (Brevik et al., 2016). Также агрохимические картограммы в недалеком прошлом имели дискретное деление на классы по элементарным участкам опробования, которым присваивалось среднее значение содержания элементов питания в классе (Крыщенко и др., 2013, Сахабиев и др. 2015). Тем не менее, в пределах исследуемых классов существует неучтенная вариабельность и конечный прогноз распределения элементов питания является не точным (Webster, 2000).

Методы цифровой картографии имеют преимущество перед указанными недостатками за счет установления статистических взаимосвязей между почвами и ландшафтно-экологическими переменными, а также учета пространственной взаимозависимости (автокорреляции) в почвенных свойствах. Это позволяет получать новые знания о состоянии почвенного покрова, давать доступ к новым возможностям для решения научно-практических задач, таких как, почвенно-экологический мониторинг, инвентаризация земельного фонда, моделирование и прогнозирование почвенных процессов и пространственного распределения свойств почв. От корректного решения указанных задач во многом зависит оптимизация и рациональное использование природных ресурсов, воспроизводство плодородия и предотвращение деградации почвенного покрова. Соответственно с каждым годом растет необходимость точной информации о пространственном распределении почв и почвенных свойств (Hartemink et al., 2008; Brevik et al., 2016; Minasny et al., 2016).

Первые публикации о почвенной цифровой картографии относятся к 1980 годам (Мешалкина, 2012), в это же время в почвоведение из геологии перешли геостатистические методы, позволяющие исследовать пространственное распределение почвенного покрова. В 1990-х годах в почвоведении сформировалось педометрическое направление, включающее в себя статистику и геостатистику и занимающееся количественным описанием и прогнозированием распределения и генезиса почв (McBratney et al., 2000; Мешалкина, 2012). К сожалению, лидирующие позиции в цифровом картографировании почв занимают зарубежные исследователи. Тем не менее, в 2012 году увидел свет первый отечественный сборник материалов по использованию цифровых методов в почвенной картографии (Цифровая почвенная картография..., 2012).

Поворотным моментом в цифровой картографии почв считается 2003 год, когда после публикации МакБратни с соавт. статьи «On digital soil mapping» (McBratney et al., 2003) в почвоведении возник публикационный бум, касающийся применения идей цифрового картографирования к описанию пространственного распределения почв и их свойств (Lagacherie et al., 2006; Hengl, 2007b; Li et al., 2008; Флоринский, 2009; Grunwald, 2009; Li, 2010; Abdel-Kader, 2011; Odgers, et al. 2011; Мешалкина, 2012; Савин, 2012; Хитров, 2012; Zhang et al., 2012; Adhikari et al., 2014; Evans et al., 2014; Lacoste et al., 2014; Levi et al., 2014; Bishop et al., 2015; Miller et al., 2015; Rodríguez-Lado et al., 2015; Brevik et al., 2016; Minasny et al., 2016; Zhang et al., 2016). После публикации МакБратни с соавт. была проведена серия глобальных международных семинаров по цифровому картографированию почв (Мешалкина, 2012). Первый глобальный семинар был проведен в 2004 году в Монпелье, Франция. Его темой была «Цифровая картография почв: вводная перспектива». На этом семинаре был обсужден широкий спектр навыков и инструментов, которые могут быть использованы для создания цифровых карт почв. На последующих семинарах были выделены методы и приложения цифрового картирования почв; обсуждены экологическое

применение и эксплуатация цифровых почвенных карт, вопросы пространственных масштабов; указаны текущие и потенциальные вклады цифровой картографии в различные оценки почв; выделены достижения в области парадигм цифрового картирования почв, масштабов и используемых границ (Мешалкина, 2012; Minasny et al., 2016; Zhang et al., 2016).

1.1 Теоретическая и методологическая основа цифрового почвенного картографирования

Цифровое картографирование почвы определяется как создание и компьютерное производство пространственных почвенных информационных систем с использованием полевых и лабораторных методов наблюдений в сочетании с системами логического вывода для пространственных и не пространственных почвенных данных (Lagacherie et al., 2006, Мешалкина 2012). Были предложены также другие термины, в том числе: компьютерная картография почв, численная картография почв, педометрическая картография, экологическая корреляция, прогнозное почвенное картографирование, или географическая экстраполяции с использованием моделей (Minasny et al., 2016).

Суть цифрового прогнозного почвенного картографирования заключается в прогнозе почвенных таксономических единиц и свойств почв на основе пространственно распределенных количественных характеристик факторов почвообразования (Флоринский, 2012б; Шеин и др., 2016). Пространственный прогноз подразумевает получение значений исследуемых показателей в местоположениях, где не был произведен отбор проб. Большинство работ в области цифрового картографирования почв основаны на создании численной модели, которая связывает полевые наблюдения почв и факторы почвообразования (например, Grunwald, 2009; Li, 2010; Zhang et al., 2012; Evans et al., 2014; Bishop et al., 2015; Minasny et al., 2016).

В общем виде моделирование пространственного изменения почв и их свойств представляется следующим уравнением, связывающим почвенные

наблюдения и количественные факторы почвообразования (Матерон, 1968; Keskin et al., 2018):

$$Z(x) = \mu(x) + \varepsilon(x) + \varepsilon'(x), \quad (1)$$

где x - местоположение в одном, двух или трех измерениях, $Z(x)$: случайная величина Z в местоположении x , $\mu(x)$ - детерминированная структурная составляющая, тренд, $\varepsilon(x)$ - стохастическая компонента, пространственно зависимый остаток от $\mu(x)$, $\varepsilon'(x)$ - непространственно-коррелируемый компонент, необъяснимая изменчивость.

Детерминированная и стохастическая части уравнения (1) могут реализовываться как по отдельности, так в виде гибридных моделей. Детерминированная часть описывается с помощью линейных и нелинейных регрессионных моделей, классификационных и регрессионных деревьев, случайных лесов, машинного обучения, нейронных сетей и т.д., пространственная зависимость учитывается в виде геостатистических процедур (простой, ординарный кригинг). Гибридные модели, в свою очередь, включают как детерминированную, так и стохастическую компоненту пространственной вариабельности почв и почвенных свойств (к примеру, регрессионный кригинг, универсальный кригинг, кригинг с внешним дрейфом и т.д.).

Для описания пространственного распределения почв и почвенных свойств был предложено несколько теоретических моделей. Наиболее известным теоретическим основанием для прогнозного почвенного картографирования служит модель Scorpion, которая была предложена МакБратни с соавт. (McBratney et al., 2003). Модель Scorpion записывается в виде

$$S_c = f(s, c, o, r, p, a, n), S_a = f(s, c, o, r, p, a, n) \quad (2)$$

где S_c - почвенные таксономические единицы, S_a - количественное значение свойства почвы, s - почва, либо другие свойства почвы, c -климатические характеристики, o - организмы, растительность, фауна, человек, r –рельеф

(морфометрические величины), p - литология, a - время, n - пространственное положение.

Модель Scorpan развивает идеи Докучаева-Захарова-Йенни (Флоринский, 2012а; Мешалкина, 2012). Суть модели состоит в том, что почвенные свойства и классификационная принадлежность почв рассматриваются как функция от факторов почвообразования и/или индикаторов (Мешалкина, 2012), которые могут быть выражены как количественно, так и качественно. Тем не менее, в цифровой почвенной картографии чаще используются количественные показатели факторов почвообразования.

Авторы модели Scorpan указывают, что формула (2) является версией формулы Г. Йенни от 1941 г.:

$$S = f(cl, o, r, p, t, \dots) \quad (3)$$

где cl = климат, o = организмы, r = рельеф, p = почвообразующий материал и t = время.

Грюнвальд С. расширила модель Scorpan, рассматривая каждый почвообразующий фактор как функцию пространства и времени (Grunwald, 2006; Grunwald, 2009). Расширенная модель приняла следующий вид:

$$S_a[x, y, \sim t] \text{ или } S_c[x, y, \sim t] \\ = f(s[x, y, \sim t], c[x, y, \sim t], o[x, y, \sim t], r[x, y, \sim t], p[x, y, \sim t], a[x, y, \sim t], n) \quad (4)$$

где S_a - атрибут почв, S_c - класс почв, s - почвы, другие атрибуты почв в точке, c - климатический фактор, o - организмы, активность вегетации, фауны или человека, r - рельеф (топография, атрибуты местности), p - материнская порода, литология, a - возраст, фактор времени, n - пространство, пространственное положение, t - время (где t определено как приблизительное время)

Позже Грюнвальд с соавт. разработали модель STEP-AWBH, описывающая отношения между свойствами почвы и переменными окружающей среды (Grunwald et al., 2011). Модель имеет вид:

$$\begin{aligned}
SA(z, p_x, t_c) = & \\
& f \left\{ \sum_j^n [S_j(z, p_x, t_c), T_j(p_x, t_c), \right. \\
& \quad \left. E_j(p_x, t_c), P_j(p_x, t_c)] \right\}; \\
& \int_{i=0}^m \left\{ \sum_j^n [A_j(p_x, t_i), W_j(p_x, t_i), \right. \\
& \quad \left. B_j(p_x, t_i), H_j(p_x, t_i)] \right\}
\end{aligned}
\tag{5}$$

где SA - целевое почвенное свойство (например, органический углерод почв), S - вспомогательные свойства почвы (например, гранулометрический состав почв, спектральные почвенные данные), T - топографические свойства, E - экологические и географические свойства (например, физиографический регион, экорегион), P - почвовообразующий материал и геологические свойства, A - атмосферные свойства, W - водные свойства (например, поверхностный сток, скорость инфильтрации), B - биотические свойства (например, растительность или растительный покров, землепользование, изменение землепользования, спектральные показатели, полученные из дистанционного зондирования, организмы), H - антропогенные воздействия (например, загрязнение, выбросы парниковых газов), j - количество свойств из $j = 1, 2, \dots, n$, p_x - пиксель размером x (ширина = длина = x) в определенном месте на Земле, t_c - текущее время, t_i - время t_c с шагом времени $i = 0, 1, 2, \dots, m$ и z – глубина.

Модель STEP-AWBH также опирается на модель Йенни. Однако, Флоринский И.В. показал, что чередование фамилий в цепочке «Докучаев-Захаров-Йенни» указывает на первоочередность высказываний о функциональной связи факторов почвообразования с почвой (Флоринский, 2012а; Florinsky, 2012). Строго говоря, зарубежными исследователями до сих недооценивается вклад отечественных исследований в установление взаимоотношений между почвами, их свойствами и моделирование

почвенных взаимосвязей между элементами окружающей среды. Докучаев В.В. еще в 1899 г. предложил формализованное уравнение почвообразование (6), которое затем было дополнено Захаровым С.А (7) в 1927 г. Формула Докучаева имела вид:

$$П = f(K, O, \Gamma)B \quad (6)$$

где П - почва, К -климат, О - организмы, Г -материнская порода, В -возраст почв. Рельеф не вошел в это выражение по ошибке стенографиста (Флоринский, 2012б).

Модель Захарова, характеризующая почву как функцию от факторов почвообразования, была представлена в следующем виде:

$$\pi = f(M. \Gamma. П., P. Ж. Орг., Кл., Возр. стр., P - ф) \quad (7)$$

где π - почва, М.Г.П. - материнская порода, Р.Ж.Орг. - организмы, Кл. - Климат, Возр. стр. - время, Р-ф - рельеф.

После выхода вышеуказанных работ Флоринского И.В авторы модели Scorpan фактически признали влияние русской школы почвоведения на формулировку Г. Йенни. Но в то же время ими подчеркивается, что, в отличие от факториальной модели Йенни или уравнения Захарова, модель Scorpan используется для количественного прогнозирования классов почвы или непрерывных показателей почвы, основанных на эмпирических наблюдениях, а не пытается объяснить факторы почвообразования (Minasny et al., 2016). Кроме того, почва может быть использована в качестве фактора, поскольку почва может быть предсказана из ее свойств, или свойства почв могут быть спрогнозированы из класса почв или других свойств почв.

В дополнение к более конкретному использованию показателей окружающей среды, связанных с традиционными почвообразующими факторами, модель Scorpan использует пространственную автокорреляцию (Minasny et al., 2016). Этот дополнительный вклад в модель является менее связанным с почвообразующими процессами, но он повышает пространственные предсказания от использования информации из образцов

почвы, измеренных в близком расположении друг к другу (Brevik et al., 2016).

В этом случае модель McBratney et al. (2003) записывается в виде: (Minasny et al., 2016).

$$S_c = f(s, c, o, r, p, a, n), \text{ или } S_a = f(s, c, o, r, p, a, n) + e \quad (8)$$

где e - это пространственно коррелированные остатки модели пространственного прогноза.

Таким образом, на сегодняшний день в цифровой почвенной картографии распространены два взаимодополняющих подхода: подход почвенно-ландшафтных связей (модель Scorpan) и подход на основе модели территориальной автокорреляции (геостатистики или пространственной статистики) (Козлов и др., 2012; Жоголев, 2016; Keskin et al., 2018).

В соответствии с определением Lagacherie and McBratney (2006), цифровое почвенное картографирование должно иметь три основных компонента:

- *Вход* в форме полевых и лабораторных методов наблюдений, это включает в себя использование устаревших почвенных наблюдений или почвенных карт, а также отбор новых образцов с использованием статистических методов выборки.

- *Процесс*, используемый в терминах пространственных и непространственных систем вывода почв. Это включает в себя создание математических или статистических моделей, связывающих наблюдения почв с переменными окружающей среды или факторами почвообразования

- *Выход* в виде пространственных информационных почвенных систем, которые включают в себя выходы в виде растров прогнозирования наряду с неопределенностью прогноза.

Схематичное представление реализации концепции цифрового почвенного картографирования представлено на рисунке 2. Технологической основой цифровой модели почвенно-ландшафтных связей является растр, имеющий сплошной охват территории (Козлов и др., 2012). В качестве

входных данных моделей наряду с цифровыми растрами, характеризующими факторы почвообразования, выступают точечные наблюдения полевых и лабораторных исследований.

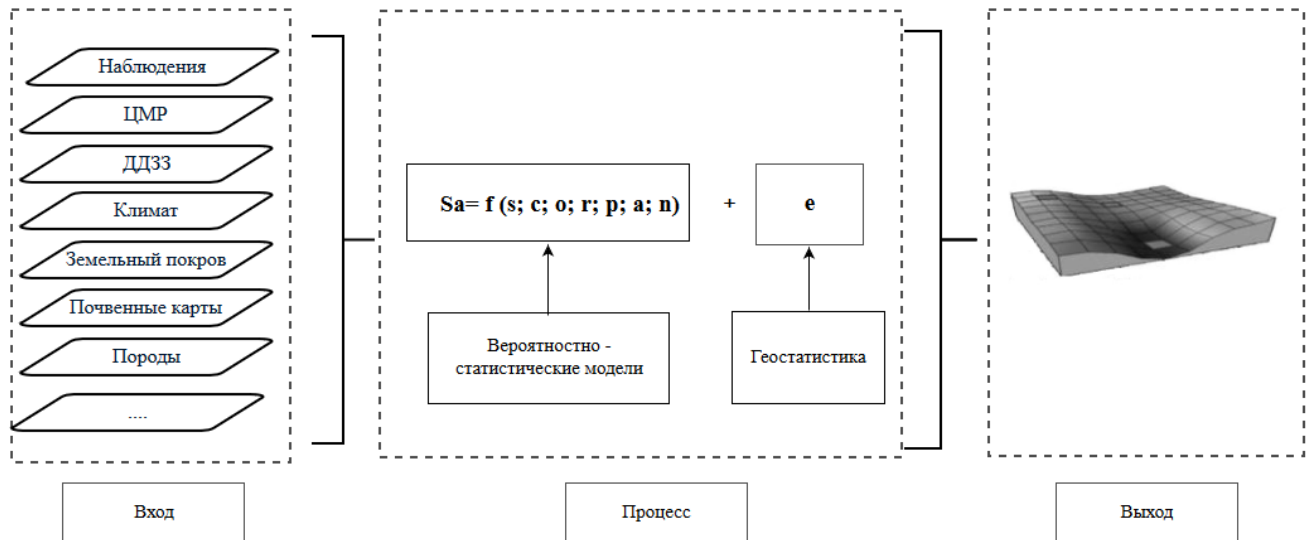


Рисунок 2. Схема реализации цифрового почвенного картографирования

На этапе процесса происходит моделирование функциональной взаимосвязи почв и почвенных свойств с факторами окружающей среды. Элементы регулярной сети (пиксели растра, элементарные территориальные единицы) с обоснованными линейными размерами служат посредниками между точечными почвенными наблюдениями и площадными ландшафтно-индикационными единицами (Козлов и др., 2012). Значения пикселя растра и площадные характеристики, на которые приходятся точечные наблюдения, участвуют в построении вероятностно-статистических моделей пространственного распространения почв и их свойств. Установление достоверных взаимосвязей между точечными наблюдениями и значениями элементарных территориальных единиц позволяет спрогнозировать моделируемое почвенное свойство для не обеспеченных полевым обследованием пикселей и дать оценку точности такого прогноза.

Содержательный обзор истории развития подходов и методов к цифровой картографии почв дан в работах Мюлдера с соавт. (Mulder et al, 2011), Бревика с соавт. (Brevik et al., 2015), Жоголева (Жоголев, 2016),

Симаковой М.С., Руховича Д.И. (Руководство ..., 2008), сборнике «Цифровая почвенная картография» и др. (Цифровая почвенная картография..., 2012).

1.2 Исследование пространственной неоднородности почвенных свойств с помощью геостатистических методов

Пространственная вариабельность почвенного покрова и его свойств интересовала исследователей с момента возникновения почвоведения как науки (Самсонова, 2003; Самсонова, 2008). Тем не менее, впервые комплексное отношение к неоднородности почв было сформулировано Е.А. Дмитриевым, который рассматривал неоднородность почвенного покрова как особое природное явление, подчиняющееся своим законам и требующее специальных методов исследования (Дмитриев, 1983). Он также предложил различать понятия «неоднородность» как собственное свойство почвы и «пространственная вариабельность» как результат взаимодействия человека и природного объекта – почвы (Мешалкина и др., 2010). По Дмитриеву Е.А. неоднородность можно рассматривать как событие, которое имеет различия явлений по заранее принятым критериям или как свойство, которое характеризует объект в целом, относится к составляющим его частям и поддается статистическому описанию (Дмитриев, 2001б). Также он отмечает, что неоднородность может трактоваться как варьирование свойств.

В целом под варьированием или вариабельностью понимается изменение свойств почвы в пределах одного и того же элементарного почвенного ареала (Григорьев и др., 1973). Глоссарий терминов по почвоведению, изданный Обществом почвоведов Америки, определяет пространственную вариабельность как изменение свойств почвы в поперечном направлении по ландшафту, или вертикально вниз по профилю почвы (Glossary of Soil Science Terms, 2008). Розанов Б.Г. относит пространственное варьирование к собственно неоднородности почв. Под собственно неоднородностью почв понимается вид почвенной неоднородности, который связан со строением почвенного покрова земной

поверхности и определяется горизонтальными взаимодействиями почвенных масс под влиянием факторов почвообразования (Розанов, 2004).

Неоднородность почвенных свойств является результатом множественных процессов, действующих и взаимодействующих в пределах пространственного почвенного континуума (Parkin, 1993, Сидорова, 2016). Неоднородность почвенных свойств обычно ассоциируется с пространственной, временной изменчивостью почв и управлением ландшафтами. Пространственная неоднородность почв и почвенных свойств возникает в ходе действия сложных процессов, работающих в течение длительных периодов времени (Hengl, 2009) на различных иерархических уровнях в зависимости от конкретных условий развития почв (Басевич, 2011)

Источниками пространственной неоднородности почвенных свойств являются естественные биотические и абиотические условия развития почв и антропогенная деятельность человека, т.е. по сути, факторы почвообразования. Каждый из этих источников может частично или полностью внести свой вклад в вариабельность свойств почв.

Большой вклад в оценку пространственных изменений свойств почв был внесен при изучении структур почвенного покрова (Фридланд, 1972), неоднородности почв (Карпачевский, 2001; Дмитриев и др., 1996; Дмитриев, 2001а; Дмитриев, 2001б; Руководство по среднемасштабному ..., 2008, Самсонова, 2008, Басевич, 2011), статистических оценок и распределения почвенных свойств (Орешкина, 1988; Фрид, 2002; Михеева, 2005). Тем не менее, неоднородность и пространственная вариабельность рассматривалась как помеха при агрохимическом обследовании и сельскохозяйственных угодий и при проведении режимных наблюдений за свойствами почв (Самсонова, 2008; Мелиховская, 2011).

Огромный интерес к пространственной неоднородности возник после появления в почвоведении геостатистических методов. Геостатистика явилась альтернативой традиционным методам представления пространственных изменений почвенного покрова, которые имели слишком

качественный характер (Heuvelink et al., 2001; McBratney et al., 2003). В отечественном почвоведении впервые теория случайных функций, которая является основой геостатистики, была применена для описания почвенного индивидуума Козловским Ф.И. (Козловский, 2003; Линник и др., 2012).

До широкого внедрения в почвоведение геостатистические методы успешно использовались в геологии. Термин «кригинг» был придуман в честь Криге Д., который в 1950-1960 гг. эмпирически разработал статистические методы для прогнозирования качества руды из пространственно коррелированных данных в золотых рудниках Южной Африки (Baveye et al., 2015). В 1960-х его подход был формализован Матерон Ж., который рассматривал вариабельность как случайный процесс (Oliver et al., 2014). Так же этим занимались Матерн (Matern) в Швеции, Гандин (Gandin) в СССР (Baveye et al., 2015). С конца 1970-х годов тысячи научных статей, книг и докладов имели дело с применением математической теории геостатистики для того чтобы охарактеризовать пространственную неоднородность почв для получения карт почвенных свойств (Baveye et al., 2015). Берджесс Т.М и Вебстер Р. были первыми, кто использовал метод кригинга в обследовании почвенного покрова (Heuvelink et al., 2001).

С момента первоначального упоминания интерес к использованию геостатистического подхода в почвоведении значительно увеличился и не планирует снижаться. Согласно библиографической базы данных Google Scholar в общей сложности 33 700 статей, глав книг и отчетов были написаны по использованию геостатистики для количественного определения пространственной вариабельности почв и пространственной неоднородности свойств почв (Baveye et al., 2015). Теперь кригинг широко применяется в области нефти и газа, горнодобывающей промышленности и геологии, метеорологии, гидрологии, почвоведении, точном земледелии, борьбе с загрязнением, здравоохранении, рыболовстве, экологии растений и животных, а также дистанционном зондировании. (Oliver et al., 2014). Тем не менее, как справедливо отмечает Самсонова В.П., в отечественном

почвоведении работы с использованием геостатистического подхода являются малочисленными (Самсонова, 2008). Среди таких работ можно выделить работы П.В. Красильникова (Геостатистика и география почв, 2007; Красильников, 2009) и Т.Т. Ефремовой с соавт. (Ефремова и др., 2013). Более ранние работы представлены работами Иванниковой и др. (Иванникова и др., 1988), Кузяковой с соавт. (Кузякова и др, 1997; Кузякова и др, 2001а; Кузякова и др., 2001б), Благовощенского с соавт. (Благовощенский и др., 2006). Также малочисленны работы с использованием геостатистических методов в агропочвоведении (Гумматов и др, 1992; Готра, 2005; Сидорова, 2007; Мелиховская, 2011; Сидорова, 2012; Самсонова и др., 2014; Самсонова и др., 2017).

Сущность геостатистического подхода заключается в пространственном прогнозе интересующей переменной по всей области исследования с использованием оценки пространственной зависимости между точками и методов пространственной интерполяции. Геостатистика позволяет провести количественное определение пространственной автокорреляции между экологическими свойствами для предсказания свойств целевой переменной в неизмеренных местоположениях (Webster et al., 2007), что позволяет определить масштаб пространственной неоднородности, содействуя лучшему пониманию механизмов и процессов, которые управляют пространственными структурами (Goovaerts, 1997). Отличие геостатистики от классической статистики состоит в том, что в ней учитываются географические координаты точек опробования (Мешалкина и др., 2010).

Использование геостатистики основано на следующих предположениях: непрерывность в пространстве, переменные как результат случайного процесса, нахождение процесса в неподвижном состоянии при движении от точки к точке - стационарность (Webster, 2000; Oliver et al., 2014).

Фундаментальной основой для геостатистики является переменная $Z(x)$, которая является одновременно и случайной и пространственно автокоррелированной. В своей простейшей форме модель имеет вид:

$$Z(x) = \mu + \varepsilon(x), \quad (9)$$

где μ является средним, $\varepsilon(x)$ – случайные остатки. Уравнение (9) называется непрерывной моделью пространственного изменения (Neuvelink et al., 2001).

В контексте проектирования испытаний в сельском хозяйстве Фишер Р.А. отмечал, что «пятна (почв), находящиеся в непосредственной близости, как правило, более похожи, о чем можно судить по урожайности, чем те, которые находятся дальше друг от друга» (Haining, 2003). Это явление основано на одном из фундаментальных принципов географии, который гласит, что объекты, близко расположенные друг к другу, как правило, являются более похожими между собой, чем объекты, удаленные друг от друга. (Tobler, 1970). Данный принцип выражается в пространственной автокорреляции переменных, которая определяется в виде взаимной корреляции между различными значениями одного и того же признака, пространственно смещенных друг от друга на заранее заданную величину (Legendre et al., 1989; Legendre, 1993; Haining, 2003; Overmans et al., 2003; Fortin et al., 2005; Paradis, 2006; Cai et al., 2006; Burt et al., 2009; Fischer et al., 2010; Borcard et al., 2011; Plant, 2012; Bivand et al., 2013; Montrone et al., 2013, Banerjee et al., 2014). Другими словами, если соседние значения тесно связаны друг с другом, то в этом случае существует сильная пространственная автокорреляция. В противном случае, если значения распространены случайным образом по поверхности, то никаких признаков пространственной автокорреляции не наблюдается (Cai et al., 2006). Наряду с этим, Фортин с соавт. отмечают, что следует различать понятия «автокорреляция» и «пространственная зависимость». Автокорреляцией является корреляция переменной с самой собой в пространстве, а пространственная зависимостью они обозначают отклик переменной на

экзогенные и эндогенные процессы в виде автокорреляции (Fortin et al., 2005). Пространственная автокорреляция является более сложной, чем одномерная автокорреляция, поскольку пространственная корреляция многомерна (несколько пространственных измерений) и мультинаправлена (DiMaggio, 2014). Исследователями было отмечено, что игнорирование пространственной автокорреляции данных в пространственных исследованиях может привести к серьезным ошибкам в интерпретации полученной модели (Getis et al., 1992). К тому же использование стандартных статистических методов при наличии пространственной автокорреляции может быть некорректным, поскольку в этом случае данные не будут являться статистически независимыми и идентично распределенными, нарушается предположение о независимости ошибок, что является основными предположениями использования параметрических статистических методов (Legendre, 1993; Overmans et al., 2003; Fortin et al., 2005; Burt et al., 2009; Borcard et al., 2011).

Исследование пространственной корреляции может быть полезным для оценки причин возникновения доминирующих пространственных структур. Существуют две основные причины наличия пространственной структуры в данных. Во-первых, пространственная структура может быть вызвана зависимостью целевой переменной от одной или нескольких переменных, которые являются пространственно структурированными. Это проявляется в виде тренда или градиента данных. Тренд характеризуется тем, что общее среднее целевой переменной может изменяться на всей области отбора проб под действием глобального процесса. Тренд может быть связан с процессом, происходящим в гораздо большем масштабе, чем площадь выборки. Во-вторых, пространственная структура может появиться в том случае, если процесс, связанный с целевой переменной, самостоятельно является пространственным, и отражает взаимодействие между участками исследования. В реальности оба случая могут влиять на наличие пространственной структуры в данных (Overmans et al., 2003).

Пространственная зависимость содержит полезную информацию, но должны быть использованы соответствующие статистические методы для ее описания. Многие методы пространственного анализа посвящены измерению величины и степени пространственной неоднородности и тестированию пространственной корреляции (иными словами, пространственных структур любого рода) (Borcard et al., 2011).

Моделирование пространственной корреляции лежит в основе геостатистики (Rebesma, 2006). Пространственная корреляция переменных в геостатистике выражается через значение полудисперсии (полувариации):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[\{Z(x) - Z(x+h)\}^2] = \frac{1}{2} E[\{\varepsilon(x) - \varepsilon(x+h)\}^2] \quad (10)$$

где E означает математическое ожидание, h является вектором, разделяющим две точки x и $x+h$.

В уравнении (10) неявно предполагается, что полудисперсия зависит только от расстояния h , а не от позиций x и $x+h$. Это предположение часто делается для облегчения идентификации наблюдений $Z(x)$.

Функция, связывающая полудисперсию с лагом h (lag), называется вариограммой (рис. 3). (Neuvelink et al., 2001). Пространственная зависимость проявляется в вариограмме обычно путем монотонного возрастания от начала координат с увеличением расстояния лага. Таким образом, возле точек, близко расположенных друг к другу, среднее значение является более похожим, чем у точек расположенных дальше друг от друга (Oliver, 2014).

Вариограмма может достичь верхней границы (sill – «порог») на конечном расстоянии (range – «диапазон», радиус корреляции), за которым уже нет пространственной автокорреляции. Порог теоретически равен дисперсии (Самсонова, 2008). Однако зачастую в данных присутствует заметная закономерная составляющая, которая дает неограниченно возрастающую вариограмму. Наггет («nugget») выражает некоррелированный компонент вариации (необъяснимую дисперсию). Он

может характеризоваться как случайными ошибками измерения, так и вариабельностью на расстояниях меньше шага опробования, которая связана с недостаточным количеством выборки (Самсонова, 2008).

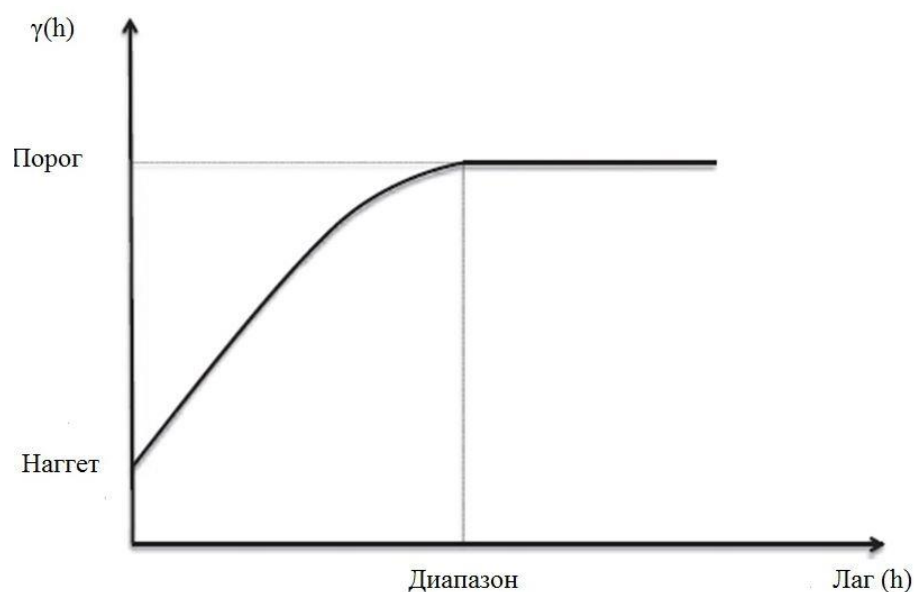


Рисунок 3. Вид вариограммы сферической модели

Вариограммы могут рассчитываться в зависимости от направления. В случае, когда свойства вариограммы имеют отличия по разным направлениям, наблюдается анизотропия, что характеризует неравномерное распределение целевой переменной в пространстве (Мешалкина и др., 2010).

Конечной целью большинства экологов, почвоведов, фермеров является получение карт распределения целевых переменных в пространстве (Oliver et al., 2014). На практике данная цель реализуется по схеме, представленной на рисунке 4. Эта схема используется в большинстве научных статей, где осуществлено применение геостатистического подхода к характеристике неоднородности свойств почв. (Baveye et al., 2015). Значения целевой переменной используются для оценки геостатистической функции (эмпирическая вариограмма), к которой «подбираются» несколько стандартных параметрических теоретических моделей. Описание теоретических моделей можно найти у Самсоновой В.П. (Самсонова, 2008), Вебстера Р. и Оливера М.А. (Webster et al., 2007) Эти модели, в свою очередь,

через процессы интерполяции, известные как (ко)кригинг, позволяют производить карты почвенных свойств.

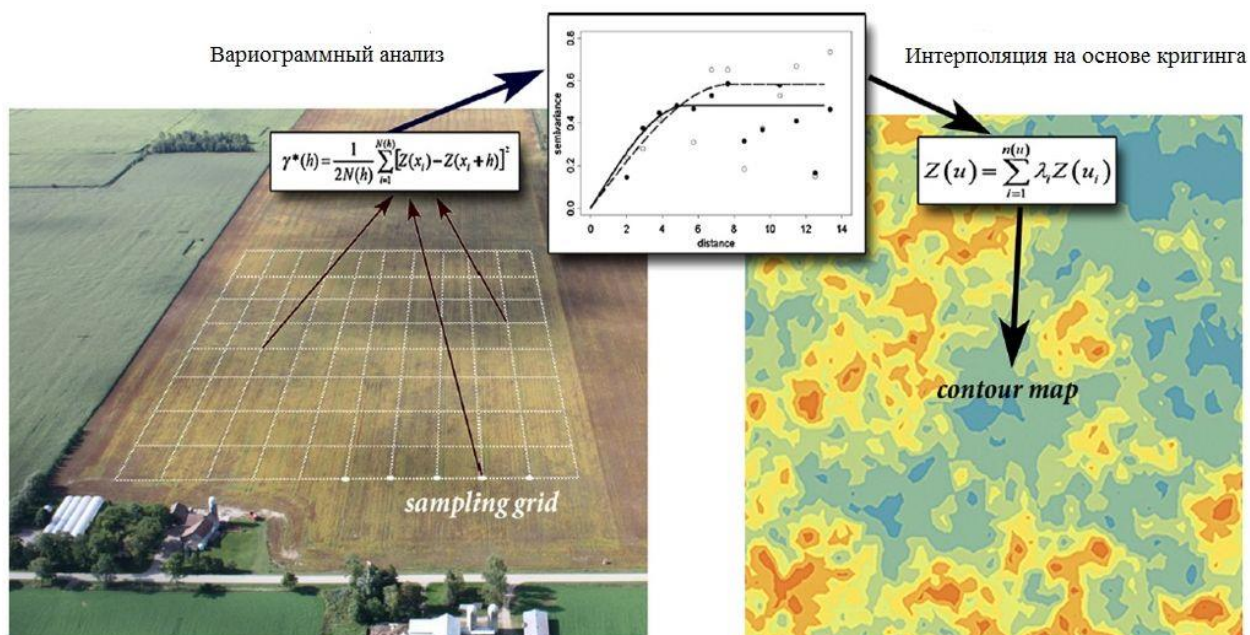


Рисунок 4. Схематическое изображение парадигмы, принятой в литературе по применению геостатистики в почвоведении (Baveye, 2015).

Однако, Бавей П.С. с соавт. в своем обзоре представили мнения ряда исследователей, которые поставили под сомнение указанную на рисунке 4 парадигму (Baveye et al., 2015). Некоторые критические замечания по поводу геостатистики акцентируются на технических аспектах. Наряду с этим, одним из спорных моментов является применение методов интерполяции, в частности кригинга, без учета базовых предположений геостатистики. Развитие вычислительной мощности компьютеров, дешевизна и доступность программного обеспечения позволили многим ученым-экологам использовать геостатистику, и, в частности, ординарный кригинг для интерполяции и картографирования свойств почв. Однако, как отмечают Оливер М.А. с соавт. необдуманное «нажатие нескольких кнопок» может привести к ненадежным и даже ошибочным результатам (Oliver et al., 2014). В своей статье авторы достаточно подробно описали методологию вычисления и моделирования вариограмм и кригинга, указали предположения, необходимые для их реализации. (Oliver et al., 2014).

Действительно, кригинг стал очень популярным в исследованиях распределения переменных в пространстве. Ларк Р.М. отмечает, что ординарный кригинг «остается рабочей лошадкой прикладной геостатистики в почвоведении и других областях» (Lark, 2012). Его популярность обусловлена тем, что в отличие от других методов кригинг обладает свойством «наилучшего линейного несмещенного оценщика» (Самсонова, 2008), т.е. оценки свойств с минимальной дисперсией в местах, где опробование не проводилось. В настоящее время имеется много разновидностей этого метода (простой, обычный, универсальный кригинг, точечный и блочный кригинг, регрессионный кригинг и т. д.). Обзор методов кригинга, применяемых в почвоведении и в смежных науках, сделан в работах Вебстера Р. и Оливер М.А. (Webster et al., 2007), Ли Д. и Хепа А. Д. (Li et al., 2008).

Стоит отметить, что кроме традиционных методов интерполяции, основанных на геостатистике, существуют гибридные методы, включающие детерминированную и стохастическую части неоднородности (регрессионный кригинг). Также исследователями могут использоваться методы, не имеющие геостатистической компоненты, к которым относятся методы, основанные на экологической корреляции (различные виды регрессии: от линейных форм до аддитивных моделей), методы регрессионных и классификационных деревьев.

Подход с использованием гибридных методов осуществляет пространственный прогноз на основе моделирования отношений между целевой переменной и вспомогательными показателями окружающей среды в местах выборок и применяет его к местоположениям, где не был осуществлен отбор проб, с использованием известного значения вспомогательных переменных в этих местоположениях (Hengl, 2007a). Суть регрессионного кригинга сводится к получению объединенного пространственного прогноза целевых переменных, который состоит из детерминированной и стохастической части неоднородности.

Детерминированная часть описывается с помощью регрессионных моделей, стохастическая часть неоднородности, оставшаяся после регрессионного моделирования, оценивается на основе учета пространственной автокорреляции остатков регрессии. С помощью регрессионного кригинга можно использовать сколь угодно сложные формы регрессии для описания детерминированной части пространственной неоднородности данных, что выгодно отличает его от других методов интерполяции. В случае отсутствия отношений между целевой переменной и вспомогательными переменными окружающей среды регрессионный кригинг сводится к ординарному кригингу. С другой стороны, в случае отсутствия автокорреляции в остатках регрессионных моделей гибридный метод сводится к регрессионному моделированию (Keskin et al. 2018).

Разнообразие методов интерполяции способствовало появлению обширного количества публикаций, которые непосредственно направлены на сравнение различных интерполяционных техник пространственного прогноза почв и почвенных свойств (Kravchenko et al., 1999; Bishop et al., 2001; Robinson et al., 2006; Hengl, 2007b; Grunwald, 2009; Zhu et al., 2010b; Ließ et al., 2012; Li et al., 2014; Liu et al., 2015) или используют подобное сравнение для целей исследования (Chai et al., 2008; Li, 2010; Zhang et al., 2012; Bourennane et al., 2014; Rodríguez-Lado et al., 2015, Vermeulen et al., 2017). Тем не менее, однозначного ответа на вопрос какой метод интерполяции использовать для пространственного прогноза почвенно-экологических переменных до сих пор не существует (Li et al., 2014). Однако точность прогнозирования почв и почвенных свойств улучшается за счет дополнительного использования пространственной ассоциации с факторами почвообразования (например, Odeh et al., 1995; Li, 2010; Zhang et al., 2012; Adhikari et al., 2014; Evans et al., 2014; Levi et al., 2014, Vermeulen et al., 2017).

1.3 Показатели окружающей среды, используемые для моделирования пространственной неоднородности почвенных свойств

Статистическое моделирование пространственной неоднородности почвенных свойств состоит из нескольких основных этапов: выбор потенциальных показателей окружающей среды, характеризующих целевые переменные, создание на их основе модели и ее калибровка, а также проверка модели с конечным числом таких показателей (Grunwald, 2009; Zhang et al., 2012; Minasny et al., 2013; Lacoste et al., 2014; Miller et al., 2015; Bishop et al., 2015). Часто в научных публикациях, касающихся статистического моделирования свойств почв и цифрового почвенного картографирования, основное внимание уделяется этапам калибровки и проверки конечной модели. Этап выбора оптимального количества показателей окружающей среды объясняется не достаточно полно и, в основном, основывается на экспертных знаниях исследователя (Miller et al., 2015). Тем не менее, этот этап является одним из важных для статистического моделирования, так как от входных данных зависит, в конечном счете, точность модели, ее адекватность и значимость. Также стоит отметить, что как для исследователя, так и для практика на выбор показателей окружающей среды с целью моделирования пространственного распространения почвенных свойств оказывает влияние открытость и доступность таких данных.

В экологии и почвоведении под показателями окружающей среды понимают такие переменные, которые могут быть интерпретированы в терминах прямых факторов, оказывающих непосредственное влияние на целевую переменную (Шарый, 2016). По сути, они являются факторами почвообразования, с помощью которых можно получить пространственный прогноз почвенных свойств. Такие показатели окружающей среды принято называть предикторами. Предикторами в геостатистическом моделировании в основном являются параметры земной поверхности (El-Sheimy et al., 2005), изображения дистанционного зондирования (López-Granados et al., 2005; Савельев и др., 2012б; Симакова, 2014), геологические, почвенные

параметры, данные урожайности и карты землепользования (McKenzie et al., 1999; Li, 2010). Предикторы, используемые для статистического моделирования свойств почв можно условно разделить на две группы. Первую группу составляют показатели, коррелирующие с целевой переменной (например, содержание гумуса и содержание элементов питания, содержание глины и содержание гумуса, содержание глины и содержание химических элементов и т.д.). Стоит, однако, отметить, что функциональные отношения и коэффициенты корреляции между подобными экологическими переменными могут отличаться для различных областей исследования, разных времен года и разных пространственных масштабов (Hengl, 2009). Вторая группа предикторов, называемая группой вспомогательных переменных, включает переменные окружающей среды, которые потенциально могут оказывать влияние на целевые переменные. Хенгл Т. рассматривает некоторые из широко известных вспомогательных переменных, которые представляют интерес для различных приложений в геостатистическом моделировании (Hengl, 2009).

Для моделирования пространственного распространения свойств почв часто используются данные, получаемые из цифровой модели рельефа (высота, уклон, экспозиция, кривизна местности и т.д.) (Шарый, 2006; Флоринский, 2009), данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и получаемые на их основе спектральные индексы, данные проксимального зондирования (E_{sa} , данные электромагнитной индукции и т.д.), карты почв, геологические карты, карты землепользования и т.д. (McKenzie et al., 1999; McBratney et al., 2003; Hengl, 2009; Benedetto et al., 2012).

Для количественного сопоставления свойств почв с рельефом и иными факторами среды необходим достаточно представительный набор морфометрических характеристик рельефа в каждой точке наблюдения (Шарый и др., 2013). В последние несколько десятков лет появились работы, в которых на основе экспертных знаний и с учетом доступности данных, практически сформировался список вспомогательных предикторов для

статистического моделирования пространственной неоднородности основных свойств почв (Scull et al., 2005; Hengl et al., 2007a; Odgers et al., 2011; Kumar et al., 2012; Ließ et al., 2012; Zhang et al., 2012; Liu et al., 2013; Bourennane et al., 2014; Evans et al., 2014; Levi et al., 2014; Bishop et al., 2015; Li et al., 2016; Miller et al., 2015). В одной из работ последних лет Миллер с соавт., к примеру, исследуют возможность использования большого количества потенциальных предикторов для статистического моделирования пространственного распределения таких свойств почв, как содержание органического углерода, содержание пыли (silt), объемная масса почв (bulk density), мощность верхнего слоя почвы. Для этого исследования был собран набор из разномасштабных потенциальных вспомогательных предикторов, который включал качественные классы местоположения, высоту, производные поверхности Земли (с широким диапазоном масштабов), гидрологические показатели, а также данные проксимального зондирования, данные дистанционного зондирования из нескольких источников и различного пространственного разрешения. Одним из результатов исследования являлось то, что модели с ограниченными наборами предикторов могут заменить другие предикторы, и таким образом, компенсировать недостающие переменные (Miller et al., 2015).

В таблице 1 представлена выборочная информация за 10 лет из научных публикаций, посвященных применению цифрового почвенного картографирования. Показано разнообразие вспомогательных переменных, используемых в качестве потенциальных предикторов для моделирования неоднородности почвенных свойств, а также методы, с помощью которых осуществляется оценка пространственной неоднородности почвенных показателей. Выборка статей является небольшой, но она отражает ключевой набор типов предикторов и статистических методов пространственного моделирования, используемых при цифровом картографировании почв и почвенных свойств.

Таблица 1

Разнообразие предикторов и статистических методов, используемых
для составления пространственного прогноза почвенных переменных

Переменная отклика, область исследования	Вспомогательные переменные, выбранные в качестве потенциальных предикторов	Методы моделирования неоднородности	Ссылка
Тип почв пустынных ландшафтов, Калифорния	1. Каналы Landsat TM 1–5; 7; Landsat MSS 1–4; 2. Отношения каналов (5:7, 5:3, 3:1) 3. Панхроматическое изображение 4. Индекс NDVI 5. Максимальная температура июля и января 6. Осадки летом и зимой 8. Топографический индекс влажности 9. Потенциальная солнечная радиация 10. Юго-западная экспозиция (Southwestness) 11. Градиент уклона 12. Характеристики рельефа из базы данных 13. Карта почв и геологическая карта	Классификационные деревья	(Scull et al., 2005)
Класс текстуры почв, группы почв WRB, Иран	1. Уклон 2. Средняя кривизна (mean curvature) 3. Индекс влажности 4. Прямая приходящая солнечная радиация 5. Индексы процентилей (percentile) (SAGA) 6. Индексы разности (SAGA) 7. Индекс EVI (MODIS)	Классификация с максимальным правдоподобием; полиномиальная логистическая регрессия; регрессионный кригинг.	(Hengl et al., 2007b)
Органический углерод почв, Китай	1. Координаты точек отбора проб 2. Карта почв 3. Вегетационные индексы 4. Изображения из спутника Landsat 5 TM 5. Высота 6. Уклон местности 7. Индексы конвергенции и увлажнения 8. Плановая кривизна (Plan curvature) 9. Профильная кривизна (Profile curvature) 10. Каналы 1-7 Landsat 5 TM 11. Спектральные индексы: WDRVI, NDWI, ARVI, EVI, GSI, CI 12. Карта почв	Регрессионный кригинг, ординарный кригинг, универсальный кригинг	(Li, 2010)
Классы почв	1. Землепользование 2. Высота 3. Аспект 4. Составной топографический индекс 5. Плановая кривизна (Plan curvature) 6. Профильная кривизна (Profile curvature) 7. Landsat ETM канал 7 и канал 8 8. NDVI 9. Рельеф 10. Расстояние до потока	Пошаговая регрессия, регрессионный кригинг	(Odgers et al., 2011)

Продолжение таблицы 1

Запас органического углерода почв, Пенсильвания, США	1. Градиент уклона 2. Высота 3. Отмывка (hillshade) 4. Среднегодовая температура воздуха 5. Среднегодовое количество осадков 6. Геологическая карта 7. Карта землепользования 8. NDVI	Географический взвешенный регрессионный кригинг	(Kumar et al., 2012)
Текстура почв, южный Эквадор	1. Высота 2. Профильная кривизна 3. Плановая кривизна 4. Длина поверхностного стока	Регрессионные деревья и Случайные леса (Random Forest)	(Ließ et al., 2012)
Органический углерод почв, Китай	1. Высота 2. Уклон 3. Экспозиция 4. Фактор длина-уклон (LS-фактор) 5. Индекс влажности 6. Индекс мощности потока (SPI) 7. Тип землепользования 8. Тип текстуры почв 9. Тип почв,	Множественная линейная регрессия, ординарный кригинг, регрессионный кригинг	(Zhang et al., 2012)
Запас органического углерода почв, Китай	1. Уклон 2. Высота 3. Аспект 4. Расстояние до рек 5. Расстояние до жилых районов 6. Расстояние до дорог 7. Тип землепользования 8. Спектральные индексы: 9. спектральные индексы NDMI, NDVI	Географический взвешенный регрессионный кригинг множественная линейная регрессия, ординарный кригинг	(Liu et al., 2013)
Физические свойства почв (песок, пыль, глина, гравий, грубые фракции), Аризона, США	1. Общая кривизна (total curvature) 2. Уклон 3. Индекс влажности (SAGA wetness index) 4. Солнечная радиация 5. Изображения Landsat 7 ETM+ 6. Индексы дистанционного зондирования: 7. Отношения каналов 8. Индекс известковых осадков 9. Индекс гипсоносности (Gypsic index) 10. Индекс содержания натрия (Natric index)	Множественная линейная регрессия, ординарный кригинг, регрессионный кригинг	(Levi et al., 2014)
Органическое вещество почв, Италия	1. Высота 2. Уклон 3. Профильная кривизна 4. Плановая кривизна 5. Солнечная радиация 6. Топографический индекс влажности 7. Спектральные индексы: GSI, CI, NDVI	Ординарный кригинг, регрессионный кригинг	(Piccini et al., 2014)

Продолжение таблицы 1

Органический углерод почв, объемная масса почв, Северо-западная Франция	1. Высота 2. Разница высот 3. Градиент локального склона 4. Профильная кривизна 5. Тангенциальная кривизна 6. Высота над сетью каналов 7. Модифицированный топографический индекс влажности 8. Расстояние горизонтального поверхностного стока (Horizontal overland flow distance) 9. Расстояние вертикального поверхностного стока (Vertical overland flow distance) 10. Индекс верхней плоскости водораздела с мультиразрешением 11. Индекс нижней плоскости долины с мультиразрешением 12. Прогнозная карта почвообразующих пород 13. Литологические единицы коренных пород 14. Частота пастбищ за 15 лет 15. Частота лесов за 15 лет 16. Расстояние до самой низкой отметки 17. Расстояние до самой высокой отметки 18. Прогнозная карта мощности горизонта	Регрессионный алгоритм программы Cubist	(Lacoste et al., 2014)
Наличие /отсутствие глины, мощность до красной глины или толщина лесса над глиной, мощность глины. Висконсин, США	1. Высота 2. Сеть каналов базового уровня 3. Индекс конвергенции (Convergence index) 4. Уклон водосбора (Catchment slope) 5. Индекс верхней плоскости водораздела с мультиразрешением 6. Серия почв из базы данных SSURGO	Регрессионный кригинг	(Evans et al., 2014)
Содержание глин, Австралия	1. Пространственные координаты 2. Почвенные единицы 3. Землепользование 4. Уклон 5. Экспозиция 6. Плановая кривизна 7. Профильная кривизна 8. Индекс влажности 9. Фактор длина-уклон (LS -фактор) 10. Индекс нижней плоскости долины с мультиразрешением (MrVBF) 11. Индекс верхней плоскости водораздела с мультиразрешением (MrRTF) 12. Прямая инсоляция, 13. Диффузная инсоляция 14. Landsat 7 ETM+ (NDVI, каналы 1-6)	Линейное смешанное моделирование	(Bishop et al., 2015)

1.4 Морфометрические характеристики рельефа как компоненты цифрового почвенного картографирования

Как видно из таблицы 1 основными предикторами моделей пространственного распространения свойств почв являются, как правило, производные цифровой модели рельефа и данные дистанционного зондирования Земли. Исследование Грюнвалд С. также показало, что из 90 работ по цифровой картографии в более четверти использовали в качестве предикторов топографические переменные (Grunwald, 2009), которые рассчитываются из ЦМР.

Цифровые модели рельефа являются растровыми изображениями, в каждом пикселе которых содержится информация об абсолютной высоте (Wilson et al., 2000; Hengl, 2009; Жоголев, 2016). Наиболее широко используемым из них является продукт SRTM (Mulder et al., 2011; Савин, 2016), который представляет собой результат радарной топографической съемки территории земного шара между 60° с.ш. и 57° ю.ш. (Rabus et al., 2003).

В настоящее время накоплен огромный материал по оценке влияния рельефа на пространственное распространение почв и почвенных свойств. Существуют многочисленные попытки качественной и количественной оценки варьирования различных почвенных свойств агроландшафтов с помощью определения взаимосвязи с характеристиками рельефа (Башкин и др., 1991; Бабаян, 1997; Кузякова и др., 1997; Ачасов, 2006; Королёва и др., 2006; Филиппова и др., 2006; Шарый и др., 2013; Рухович, 2016). Помимо этого большой обзор значимости топографических атрибутов рельефа для прогнозного моделирования почв и почвенных свойств при цифровом картографировании представлен в работах Флоринского И.В. (Florinsky, 2012), Grunwald S. (Grunwald, 2006; Grunwald, 2009), Minasny B. (Minasny et al., 2013), Hengl T. (Hengl et al., 2008), Шарый П.А. (Шарый, 2016), коллективной монографии «Цифровая почвенная картография» (Цифровая почвенная картография..., 2012).

Популярность использования морфометрических показателей рельефа в почвенных исследованиях вызвана тем, что рельеф, являясь одним из основных факторов почвообразования, обозначает перераспределение тепла, света, воздуха и влаги (Добровольский и др., 2004; Геннадиев и др., 2005; Шарый, 2016), а также литодинамических потоков, что может выражаться, например, в скоплении в зонах аккумуляции мелкодисперсных частиц почв (Ковда, 1985). С другой стороны данные, полученные от ЦМР, являются числовыми представлениями характеристик рельефа (Hengl et al., 2008; Oliveira et al., 2014), которые доступно и быстро могут заменить трудно поддающиеся измерению в значительном количестве точек наблюдений прямые факторы среды, реально оказывающие воздействие на биотическую и эдафическую компоненту экосистем (Шарый, 2016).

Во многих работах связь почв или растительности с рельефом оценивается априорным выбором исследователя тех или иных морфологических характеристик рельефа, которые представляются исследователю важными (Шарый, 2016). Однако связь почв с рельефом, как правило, носит комплексный характер и описывается одновременно несколькими морфометрическими величинами, рассчитываемыми из цифровых моделей рельефа. К примеру, Шарый П.А. выделяет 18 базовых морфометрических характеристик рельефа (Шарый, 2006; Шарый, 2016).

Первичные характеристики рельефа (высота, уклон, экспозиция) определяют поверхностный сток, подверженность эрозионным процессам, особенности растительного покрова, мощность гумусового горизонта, количество солнечной энергии и ориентацию участка по отношению к потоку солнечных лучей (McBratney et al., 2003; Шарый, 2006; Флоринский, 2009, Mulder et al., 2011). Вторичные характеристики рельефа являются производными от первичных характеристик рельефа. Они, как правило, объединяют два или более первичных характеристик и определяют пространственную неоднородность конкретных процессов и показателей в ландшафте (McBratney et al., 2003).

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Почвенно-геоморфолого-геологическая характеристика государственных сортоиспытательных участков

Исследование пространственной неоднородности свойств почв территорий сельскохозяйственного производства было осуществлено на двух сортоиспытательных участках (ГСУ):

1. Заинский ГСУ расположен в юго-восточной части Республики Татарстан ($55^{\circ}05'56.0''N$ $52^{\circ}02'24.0''E$) (рис. 5). Территория сортоиспытательного участка занимает площадь, равную около 100 га (~1600 х 630 м). По геоморфологическому положению территория ГСУ относится к Восточному Закамью, которое относится к умеренно-расчлененной денудационной равнине нижнего плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности с преобладающими высотами 200-240 м. Обширные территории Восточного Закамья имеют слабовозвышенный и низменный характер рельефа. Восточное Закамье сложено преимущественно песчано-глинистыми и карбонатными породами верхнеказанского и татарского подъярусов пермской системы. Климат относительно прохладный с неравномерно увлажненными осадками летом и сравнительно холодной и недостаточно снежной зимой. Восточное Закамье – район недостаточного увлажнения. Годовая сумма осадков на севере района 500 мм, а в юго-западной и юго-восточной частях она уменьшается до 460-480 мм. Сумма биологически активных температур составляет 2221 °С. Наибольшую площадь в районе занимают выщелоченные (30,1%) и типичные (21,9%) черноземы. Почвы серого лесного типа встречаются крупными пятнами в междуречьях крупных рек. Растительный покров имеет облик типичной северной лесостепи: широколиственные леса чередуются с фрагментами остепненных лугов и луговых степей. (Ландшафты Республики Татарстан....,2007)

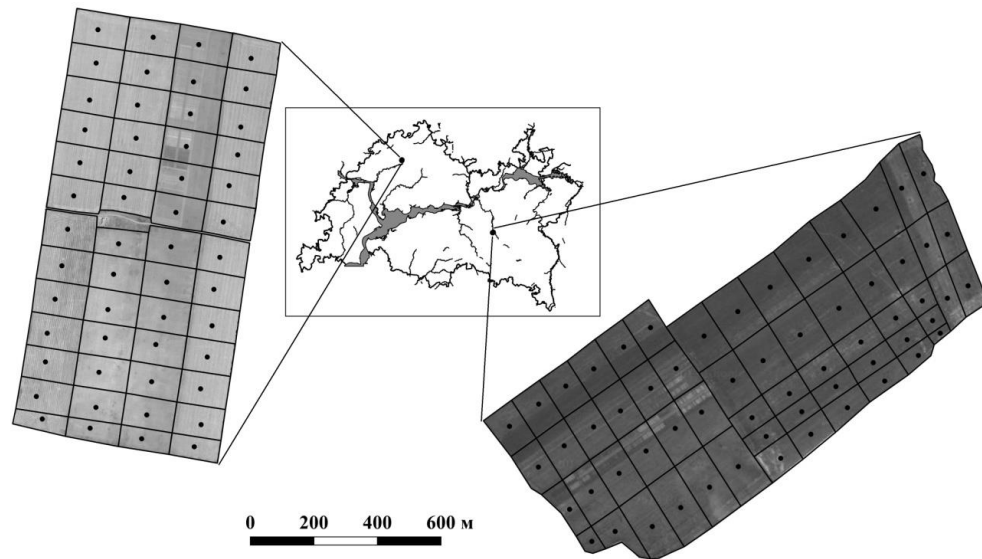


Рисунок 5. Расположение ГСУ на карте Республики Татарстан

Заинский сортоучасток расположен по пологому, довольно длинному склону к р. Степной Зай. Северо-западная часть участка представлена верхней частью водораздела, в то время как юго-восточная часть является слабопологим, слегка волнистым склоном ($< 5^\circ$) юго-восточной экспозиции (Костюкевич и др., 1987). По склону у границы участка проходят тальвеги небольшой балки. По южной и юго - восточной частям участка проходят несколько мелких, но длинных лощин. Они не нарушают в общем однородности почвенного покрова, но указывают на то, что по этим склонам происходит смыв почвенной толщи (Почвы сортоучастка № 228..., 1939; Костюкевич и др., 1987) (рис.6).

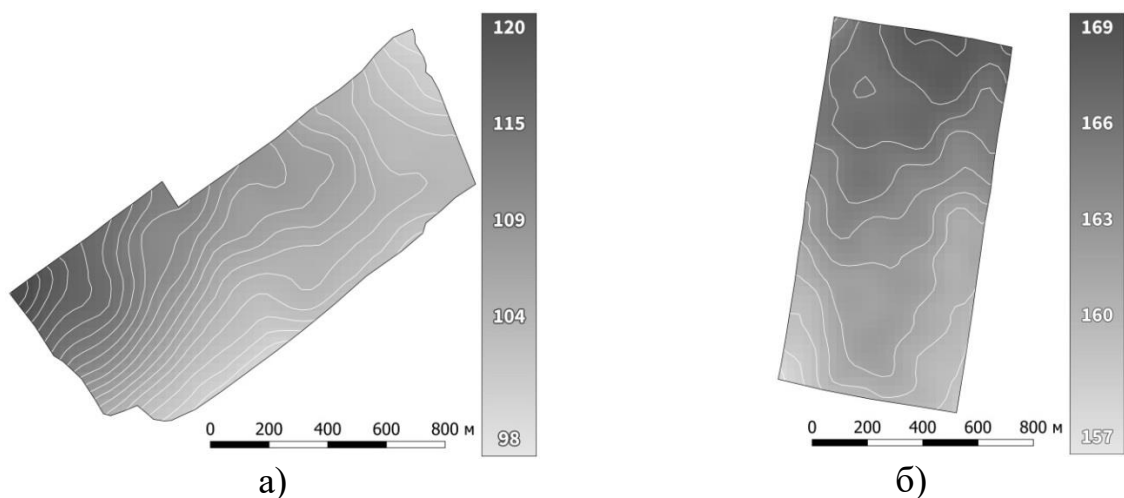
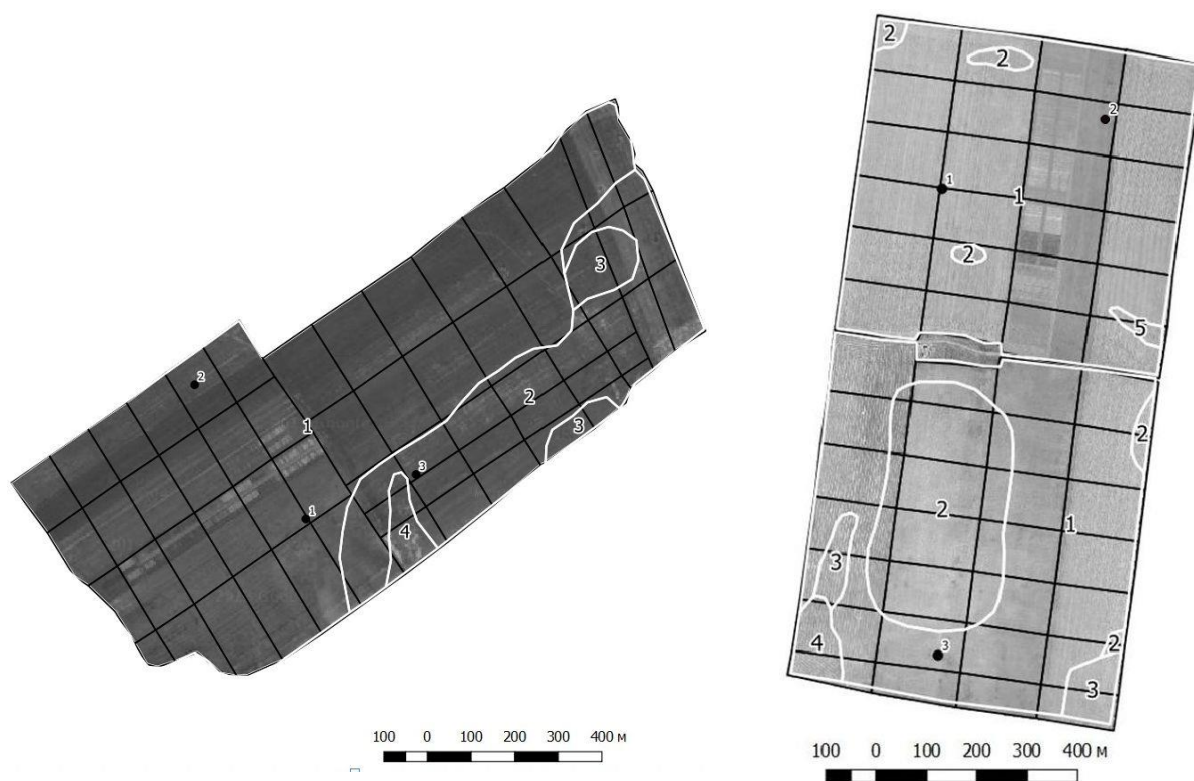


Рисунок 6. Цифровая модель рельефа с изолиниями Заинского (а) и Арского (б) ГСУ. Расстояние между изолиниями 1 м.

Почвенный покров Заинского сортоиспытательного участка представлен выщелоченными тяжелосуглинистыми черноземами, которые имеют различные породы и различную степень эродированности. На рисунке 7 представлены элементарные участки опробования и почвенные контуры с цифровым обозначением. Контуры почв выделены на основе карты-схемы почвенно-агрохимического обследования территории, проведенного в 1987 году. Расшифровка цифровых обозначений контуров почв дана в таблице 2.



а) Заинский ГСУ

б) Арский ГСУ

Рисунок 7. Расположение элементарных участков опробования и почвенные контуры на территории Заинского ГСУ (а) и Арского ГСУ (б). Точками отмечены почвенные разрезы, заложенные на территории участков.

Из таблицы 2 видно, что выделение почвенных контуров на территории Заинского ГСУ производится по наличию аллювиальных подстилающих пород, степени эродированности и мощности гумусового горизонта. Наиболее эродированные черноземы расположены в восточной и юго-восточной части ГСУ, почвы незначительно подверженные эрозии расположены в северной части участка.

Таблица 2

Расшифровка цифровых обозначений контуров почв (согласно почвенно-агрохимическому обследованию 1987 г.)

Номер контура	Почва
Заинский ГСУ	
1	Чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый на делювиальных карбонатных глинах
2	Чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый слабокаменистый на делювиальных карбонатных глинах подстилаемых древнеаллювиальными отложениями
3	Чернозем выщелоченный среднегумусный маломощный среднекаменистый тяжелосуглинистый на делювиальных карбонатных глинах подстилаемых древнеаллювиальными отложениями
4	Чернозем выщелоченный среднегумусный маломощный слабокаменистый слабосмытый тяжелосуглинистый на делювиальных карбонатных глинах подстилаемых древнеаллювиальными отложениями
Арский ГСУ	
1	Светло-серая лесная тяжелосуглинистая на делювиальных карбонатных глинах
2	Дерново-слабоподзолистая тяжелосуглинистая на делювиальных суглинках
3	Дерново-слабоподзолистая слабосмытая тяжелосуглинистая на делювиальных суглинках
4	Светло-серая лесная слабосмытая тяжелосуглинистая на делювиальных суглинках
5	Светло-серая лесная пестроцветная тяжелосуглинистая на делювиальных суглинках

Территория ГСУ сложена четвертичными и третичными отложениями - продуктами выветривания и переотложения пермской системы (Почвы сортоучастка № 228..., 1939; Костюкевич и др., 1987). Преобладающее распространение имеет татарский ярус этой системы. Почвообразующими породами являются делювиальные отложения, которые представляют собой вполне выветрелую красновато-бурую глину или же щебенчатую зеленовато-серую и красновато-бурую глину (Почвы сортоучастка № 228..., 1939). В юго-восточной и восточной части ГСУ делювиальные глины с различной глубины подстилаются древнеаллювиальными отложениями, содержащими значительное количество мелкой гальки и известнякового материала (Костюкевич и др., 1987).

Арский ГСУ располагается в северо-западной части Республики Татарстан ($56^{\circ}06'46.6''$ N, $49^{\circ}46'31.4''$ E), которая в геоморфологическом отношении соответствует территории Западного Предкамья. Район сложен породами татарского яруса верхней перми и представлен красновато-коричневыми мергелями, вишнево-красными и др. аргиллитами с тонкими прослоями серых мергелей, известняков и доломитов. Климат района характеризуется как умеренно континентальный с холодной зимой, теплым летом и достаточным количеством осадков. Сумма биологически активных температур колеблется от 2277°C до 2170°C . Годовая сумма осадков увеличивается с 500 мм на востоке до 540 мм на западе. (Ландшафты Республики Татарстан.....,2007)

Значительная часть площади района представлена пахотными угодьями, современные остатки лесов принадлежат к хвойным и лиственным лесам. Почвенный покров района характеризуется распространением лесных почв подзолистого типа – серые лесные и дерново-подзолистые почвы. На выровненных водоразделах распространены светло-серые и дерново-подзолистые тяжелосуглинистые и в меньшей мере средне- и легкосуглинистые почвы, развивающиеся на элювиальных суглинках и глинистых отложениях татарского яруса. Гранулометрический состав почв района преимущественно глинистый и тяжелосуглинистый (Братчиков и др., 1986).

Территория Арского ГСУ занимает 88 га ($\sim 1340 \times 660$ м). Рельеф представлен слабопологим склоном на водораздельном участке. Северная часть ГСУ находится на возвышенном элементе рельефа с постепенным снижением к южной части участка (рис 6, 7). Почвенный покров Арского ГСУ представлен светло-серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами (Таблица 2). В литологическом отношении зона Арского ГСУ расположена на отложениях казанского и татарского ярусов пермской системы. Казанский ярус составляет нижнюю часть толщи и представлен доломитами и известняками. Выходы этих пород занимают нижние части крупных обрывов

или склонов по речным долинам и оврагам. Породы казанского яруса почти нигде не являются почвообразующими. Татарский ярус состоит из мергелей, имеющих пеструю окраску, коричнево-красных глин и песчаников кирпично-красного, бурого, иногда зеленоватого цвета, которые часто являются карбонатными. Породы татарского яруса могут принимать участие в почвообразовании лишь в местах смыва, на крутых и высоких склонах. В большинстве случаев в районе сортоиспытательного участка породы татарского яруса перекрыты породами четвертичного периода, представленные лессовидными и делювиальными суглинками и глинами. Реже в почвообразовании территорий, обслуживаемых Арским ГСУ, принимает участие элювий пермских глин и мергелей (Преснякова, 1952; Братчиков и др., 1986).

Участки государственного сортоиспытания были выбраны для исследования по ряду причин: а) Заинский ГСУ на протяжении около 80 лет (начиная с 1939 года - момент его основания), Арский ГСУ - на протяжении 70 лет (дата основания - 1952 г.) испытывают постоянное антропогенное воздействие в виде сельскохозяйственной деятельности, включающей в себя изучение, оценку сортов и гибридов сельскохозяйственных культур и установление их пригодности для возделывания в условиях производства. Сортоиспытание культур проводится согласно методике, направленной на устранение влияния неоднородности почв. б) При выборе места заложения ГСУ был применен принцип, согласно которому ГСУ был основан на типичных участках, характеризующих почвенно-агроэкологический район.

Отбор почвенных образцов на территории ГСУ был проведен по следующей схеме: территория полей была поделена на прямоугольные элементарные участки размером 1-1,5 га, в каждом из которых для составления объединенной пробы отбиралось 20-25 единичных проб ручным пробоотборником на глубину пахотного слоя. Для геостатистического анализа объединенные пробы были пространственно привязаны к центрам соответствующих элементарных участков. В результате почвенно-

агрохимического обследования было отобрано и проанализировано 52 (Арский ГСУ) и 60 (Заинский ГСУ) объединенных проб пахотного горизонта. В образцах были определены следующие показатели почв: содержание гумуса по Тюрину, содержание подвижных форм фосфора и калия по Чирикову и Кирсанову, рН водной вытяжки потенциметрически, содержание гидролизуемых форм азота по Корнфилду, гранулометрический состав (ГМС) методом Качинского–Робинсона-Кехля с пробоподготовкой растиранием с пирофосфатом натрия.

Также на территории Заинского и Арского ГСУ были заложены почвенные разрезы (рис. 7), морфология которых была описана. Местоположения разрезов приближались к местоположениям обследования 1987 года. Помимо указанных свойств и методов их определения, по горизонтам почв определялись емкость катионного обмена (ЕКО) по Бобко - Аскинази – Алешину в модификации ЦИНАО, обменные Ca^{2+} и Mg^{2+} - трилометрическим методом, сумма обменных оснований – по Каппену – Гильковицу, гидролитическая кислотность - по Каппену, степень насыщенности основаниями – расчетным способом, общий азот - колориметрически с реактивом Несслера, фосфор подвижный по Труогу, калий подвижный по Масловой, рН солевой вытяжки – потенциметрически,

2.2 Морфометрические характеристики рельефа

В качестве вспомогательных переменных для моделирования пространственного распределения свойств почв сортоучастков использовались морфометрические характеристики рельефа, указанные в таблице 3. Они были получены из цифровой модели рельефа SRTM1 (Shuttle Radar Topography Mission, 2021) с пространственным разрешением 30 м (1 угловая секунда). Предварительно цифровая модель рельефа подвергалась сглаживающей фильтрации для удаления артефактов при расчете морфометрических характеристик. Каждой точке, характеризующей объединенную пробу, присваивалось усредненное в пределах соответствующего элементарного участка значение характеристики рельефа.

Таблица 3

Характеристики цифровой модели рельефа

№	Название	Перевод	Краткое описание	Ссылка
1	Elevation	Высота	Вертикальное расстояние над уровнем моря	(Wilson et al., 2000; Rabus et al., 2003; Maynard et al., 2016)
2	Slope	Уклон	Определяет интенсивность изменения градиента высоты, характеризует скорость поверхностного и внутрипочвенного стока	(Wilson et al., 2000; Olaya 2008; Maynard et al., 2016)
3	Aspect	Экспозиция	Направление градиента высоты, характеризует перераспределение солнечной радиации и водного потока. Циркулярная величина и не всегда пригодна для использования в линейном статистическом анализе. Так как она описывает один и тот же уклон поверхности в положении 0° и 360°, некоторые авторы предложили использовать $\cos(\text{aspect})$ (северное положение) или $\sin(\text{aspect})$ (южное положение) для вычислений.	(Wilson et al., 2000; Olaya 2008; Флоринский, 2009; Maynard, 2016; Свидзинская, 2021)
4	South-west-ness	Юго-западное положение	Рассчитывается из значений экспозиции в виде $\cos(\text{aspect}-225^\circ)$, указывает на ориентацию склона. Использовался именно этот показатель для максимального описания ориентации склона участка.	(Scull et al., 2005)
5	Profile Curvature	Профильная кривизна	Мера изменения градиента высоты, характеризует ускорение или замедление водного потока	(Wilson et al., 2000; Olaya 2008; Шарый, 2006)
6	Plan Curvature	Плановая кривизна	Измеряет топографическое схождение (convergence) или расхождение (divergence), т.е. определяет тенденцию потока воды к концентрации (положительные значения) или рассеиванию (отрицательные значения).	(Wilson et al., 2000; Шарый, 2006; Olaya, 2008; Oliveira et al., 2014)
7	General Curvature	Общая кривизна	Совокупная мера кривизны земной поверхности, которая идентифицирует ее выпуклые участки положительными значениями, а вогнутые – отрицательными независимо от направления.	(El-Sheimy et al., 2005; Терехов, 2007)
8	Longitudinal Curvature	Продольная кривизна	Без физического смысла, 1-й механизм аккумуляции, объясняет местность подобно профильной и плановой кривизне	(Wilson, 2000; Olaya 2008; Maynard, 2016)
9	Cross-Sectional Curvature	Поперечная кривизна	Без физического смысла, подобна продольной кривизне	(Wilson et al., 2000; Maynard et al., 2016)

Продолжение таблицы 3

10	Maximum Curvature	Максимальная кривизна	Описывает гребневые формы рельефа	(Шарый, 2006)
11	Minimum Curvature	Минимальная кривизна	Описывает килевые формы рельефа	(Шарый, 2006)
12	Tangential Curvature	Тангенциальная кривизна	Измеряет схождение или расхождение водного потока	(Wilson et al., 2000; Olaya 2008)
13	Stream Power Index	Индекс мощности водного потока	Определяет участки, подверженные эрозии. Может быть использован для идентификации участков, где требуются почвозащитные мероприятия, которые уменьшают эрозионное воздействие концентрированного поверхностного стока.	(Moore et al., 1991; Florinsky et al., 2002)
14	Wetness Index	Индекс влажности	Описывает склонность участка к насыщению водой с учетом топографических особенностей	(Moore et al., 1993; Pei et al., 2010)
15	SAGA Wetness Index	Топографический индекс влажности SAGA	Описывает склонность участка к насыщению водой с учетом топографических особенностей. Различается от предыдущего индекса различным путем расчета площади водосбора.	(Moore et al., 1993; Pei et al., 2010; Cimmery, 2010)
16	Catchment area	Площадь водосбора	Характеристика накопления водного потока в пределах территории	(Wilson et al., 2000; Florinsky et al., 2002; Cimmery, 2010)
17	Flow Accumulation	Накопление потока	Итеративно модифицированная площадь водосбора, характеризует накопления водного потока в пределах территории	(Maynard et al., 2016)
18	Sediment Transport Index	Индекс транспорта осадков	Характеризует процессы переноса и осаждения. Используется в усовершенствованном универсальном уравнении потери почвы (RUSLE)	(Moore et al., 1993)
19	Topographic Position Index	Топографический индекс позиции	Определяет разницу между значениями высоты в центральной точке и усредненной высотой в пределах заданного радиуса.	(Wilson et al., 2000; Florinsky et al., 2002; Reu et al., 2013)
20	Terrain Ruggedness Index	Топографический индекс шероховатости поверхности	Количественная мера топографической неоднородности	(Riley et al., 1999)

Продолжение таблицы 3

21	Convergence Index	Индекс конвергенции	Индекс схождения/расхождения водного потока. Похож на плановую кривизну, но дает более сглаженные поверхности. Результат приводится в процентах, отрицательные значения соответствуют сходящимся, положительные расходящимся условиям потока.	(Hengl et al., 2008; Eisank et al., 2014; Maynard et al., 2016)
22	Terrain Surface Convexity	Выпуклости рельефа поверхности	Низкие элементы рельефа, трудно описываемые градиентом уклона и текстурой поверхности.	(Iwahashi et al., 2007)
23	Classification Index for Lowlands	Классификационный индекс понижений рельефа	Комбинированный морфометрический индекс, детально описывает участки с низкими элементами рельефа	(Bock et al., 2007)
24	Terrain Surface Texture	Текстура рельефа поверхности	Шероховатость поверхности, или частота долин и хребтов	(Iwahashi et al., 2007)
25	Multi-Resolution Valley Bottom Flatness Index	Индекс нижней плоскости долины с мультиразрешением	Мера плоскости и низинности долин, определяет возможные участки осадконакопления	(Gallant et al., 2003; Abdel-Kader, 2011; Adhikari et al., 2014)
26	Multi-Resolution Ridge-Top - Flatness Index	Индекс верхней плоскости водораздела с мультиразрешением	Указывает на степень плоскости вершины холма	(Gallant et al., 2003; Abdel-Kader et al., 2011; Adhikari, et al., 2014; Oliveira et al., 2014)
27	Vertical Distance to Channel Network	Вертикальное расстояние до сети каналов	Описывает высоту над сетью каналов, измеряется как относительная высота на интерполированном базовом уровне сети каналов	(Eisank et al., 2014)
28	Slope Length (LS) Factor	Фактор длины уклона	Определяет эрозионные процессы, используется в универсальном уравнении потери почвы (USLE)	(Zhang et al., 2012; Qi-yong et al., 2004)
29	Valley Depth	Глубина долины	Определяет степень глубины долин	(Abdel-Kader et al., 2011; Adhikari et al., 2014)
30	Slope Height	Высота уклона	Описывает относительную высоту над ближайшей зоной аккумуляции	(Eisank et al., 2014)
31	Mid-Slope Position	Средняя часть уклона	Вычисляет степени подобия каждой точки хребту или долине, имеет значения от 0 до 100.	(Abdel-Kader et al., 2011)

2.3 Статистические методы исследования

Основные статистические показатели получены с помощью традиционной описательной статистики. Сравнение статистических величин почвенных свойств двух ГСУ проводилось с помощью критериев Манна – Уитни и Стьюдента. Для сравнения разновременных почвенных данных проводилась процедура их нормализации. Для этого значения каждого показателя были преобразованы в нормализованные значения, которые рассчитывались по формуле:

$$X_p = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (11)$$

где X_p – нормализованное значение, x_i – оригинальное значение, $X_{\max}$, $X_{\min}$ – максимальное и минимальное значение показателя, соответственно. При нормализации значения приводятся к единой шкале в диапазоне от 0 до 1, что позволяет производить сравнение между двумя периодами обследования для определения статистически значимых различий.

Цифровые карты пространственной неоднородности почвенных свойств были построены с использованием следующих геостатистических методов:

а) Ординарный кригинг (ОК). ОК представляет собой процедуру интерполяции, в которой рассчитываются взвешенные средние от наблюдений (Webster et al., 2007)

$$\widehat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (12)$$

где $\widehat{Z}(x_0)$ является прогнозируемым значением целевой переменной на местоположениях x_0 , где не был осуществлен отбор проб, учитывая данные выборки $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ и географические координаты. Веса λ_i выбирают таким образом, чтобы дисперсия ошибки прогноза

минимизировались, получая тем самым веса, которые зависят от пространственной автокорреляционной структуры переменной.

Пространственная автокорреляция данных в свою очередь тестировалась с помощью статистики I Морана (Moran's I), которая проводит измерение ковариации между ближайшими точками и статистическое сравнение совместимости ковариация со случайным пространственным расположением значений (Plant, 2012). Статистика I Морана имеет концептуальное сходство с коэффициентом корреляции Пирсона (Borcard et al., 2011; Plant, 2012). Принципиальная разница состоит в том, что пространство включено в анализ посредством матрицы пространственных весов W и вместо установления корреляции между двумя переменными, устанавливается корреляция одной переменной с самой собой против матрицы пространственных весов (Paradis, 2006; Fischer et al., 2010; Bivand et al., 2013). Статистика I Морана проводит проверку пространственной хаотичности данных; отвержение нулевой гипотезы предполагает с определенной степенью достоверности, что пространственная автокорреляция существует (Fischer et al., 2010). Статистика I Морана записывается следующим образом:

$$I = \frac{\frac{1}{W} \sum_{h=1}^n \sum_{i=1}^n w_{hi} (y_h - \bar{y})(y_i - \bar{y})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{для } h \neq i \quad (13)$$

где y_h и y_i являются значениями переменной y на парных местоположениях h и i ; $\bar{y}$ - среднее значение целевой переменной по всей совокупности значений; w_{hi} - пространственный вес, который отражает степень близости (или удаленности) между точками h и i в пространстве; W представляет собой сумму весов w_{hi} для данного дистанционного класса n - общее число наблюдений.

Матрицы пространственных весов для тестирования были рассчитаны в зависимости от расстояния. При вычислении значений статистики I Морана

было использовано предположение о рандомизации, которое компенсирует отклонение значений от нормального распределения (Bivand et al., 2013).

Значения статистики I Морана в общем колеблются между 1 и -1, хотя они могут выходить за пределы диапазона -1; +1 (Overmans et al., 2003; Montrone et al., 2013). Ожидаемое значение статистики I Морана при нулевой гипотезе нулевой пространственной автокорреляции (т.е. при отсутствии пространственной автокорреляции) не равняется 0, а выражается как

$$E(I) = \frac{-1}{n-1} \quad (14)$$

Таким образом, наблюдаемые значения статистики I Морана меньше $E(I)$ указывают на отрицательную пространственную корреляцию, а значения больше $E(I)$ указывают на положительную корреляцию. Значение $E(I)$ близко к 0, когда n велико (Burt et al., 2009; Montrone et al., 2013).

Статистические тесты автокорреляции (I Морана) описывают общий уровень автокорреляции пространственного набора данных, но они ничего не говорят о структуре этой автокорреляции (Plant, 2012). Пространственная структура описывалась с помощью вариограммного анализа, в ходе которого оценивалась автокорреляция данных и их пространственная зависимость (Cambardella et al., 1994). Вариограммный анализ представляет собой подбор теоретической модели, способной наиболее полно описать зависимость случайных величин $Z(x_i)$, и $Z(x_i + h)$, разделенных в пространстве вектором h (Савельев и др, 2012а). Пространственная анизотропия оценивалась поверхностями вариограмм и вариограммами по направлениям с углом допустимого отклонения $\pm 20^\circ$.

Вариограммный анализ проводился для предварительно стандартизированных почвенных свойств, а именно было вычтено среднее из каждого значения и поделено на стандартное отклонение. С полученными экспериментальными вариограммами были сопоставлены теоретические вариограммы и определен вид и параметры вариограмм. Подобранные

модели вариограмм в дальнейшем использовались для пространственной интерполяции методом ординарного кригинга.

б) Регрессионный кригинг (RK). Метод включает описание детерминированной части вариабельности данных с помощью регрессионного моделирования с последующим описанием стохастической части вариабельности на основе вариограммного анализа регрессионных остатков и их интерполяции ординарным кригингом (Hengl et al., 2004). В упрощенном виде регрессионный кригинг можно записать как:

$$\hat{Z}(x_0) = m(x_0) + \varepsilon(x_0), \quad (15)$$

где $m(x_0)$ является подобранным регрессионным трендом, $\varepsilon(x_0)$ - интерполированные остатки регрессии.

Для описания детерминированного тренда были использованы следующие регрессионные методы:

1. Множественная линейная регрессия (MLR). Модели линейной регрессии направлены на выяснение пространственного распределения зависимой переменной с помощью линейной комбинации предикторов.

$$Y = a + \sum_{i=1}^n b_i * x_i \pm \varepsilon \quad (16)$$

где Y - зависимая переменная (почвенное свойство), x_i - предиктор, a - свободный член, b_i - коэффициент регрессии, ε - случайная ошибка.

Линейная регрессия может показывать смещенные оценки в присутствии сильной корреляции между вспомогательными переменными. Во избежание мультиколлинеарности требуется более аккуратное построение моделей (James et al., 2013). Выбор наилучшей модели происходил согласно следующим последовательным этапам: (1) корреляционный анализ по Спирмену для проверки взаимосвязи между предикторами и целевыми переменными. Из набора исключались характеристики рельефа, для которых значения коэффициента корреляции (r) между собой соответствовали предельным значениям ($r=-1$ и $r=1$); (2) построение модели с оставшимися

вспомогательными переменными; (3) проверка предикторов на мультиколлинеарность с помощью фактора инфляции дисперсии (VIF) с пороговым значением $VIF=3$; (4) построение модели с последовательным исключением (stepwise backward selection) незначимых переменных при $\alpha=0.05$; (5) сравнение моделей с помощью информационного критерия Акайке (AIC) после каждого исключения переменной; (6) наилучшей признавалась модель с наименьшим значением AIC.

2. Регрессия на главные компоненты (PCR). Отличия от предыдущего метода заключаются в способе описания детерминированной части вариабельности: вместо исходных переменных регрессия строится на главных компонентах, являющихся линейными комбинациями исходных параметров. Такая трансформация позволяет устранить мультиколлинеарность вспомогательных данных (Qian, 2010; Kuhn et al., 2013).

Проверка моделей является важным шагом для определения их качества. Однако, Minasny с соавторами сообщают, что половина исследований, включенных в их обзор, не проводила какой-либо проверки разработанных моделей (Minasny et al., 2013).

В данной работе оценка точности пространственного прогноза проводилась в виде внутренней проверки с помощью LOOCV- перекрестной проверки (leave-one-out cross validation). Для этого из исходного набора данных последовательно изымалось по одному наблюдаемому значению o_i , для которого затем вычислялось прогнозное значение p_i , используя остальной набор данных. Затем по разнице $p_i - o_i$ вычислялись следующие показатели оценки точности (Li et al., 2010; Samuel-Rosa et al., 2015):

Усредненная ошибка:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i) \quad (17)$$

Среднеквадратичная ошибка:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

Соотношение дисперсии прогнозированных значений к дисперсии наблюдаемых значений:

$$RVar = \frac{Var[p]}{Var[o]} \quad (19)$$

Показатель RPIQ (ratio of performance to interquartile range), который характеризует отношение производительности к межквартильному диапазону (Bellon-Maurel et al., 2010)

$$RPIQ = \frac{IQ}{RMSE} \quad (20)$$

IQ - межквартильный диапазон, который представляет собой разницу между 25% (Q_1) и 75% (Q_3) квартилями ($IQ = Q_3 - Q_1$). Показатель RPIQ в отличие от RMSE обеспечивает безразмерную статистику, которая является более эффективной в оценке точности модели (Castaldi et al., 2014).

Показатель MSDR (mean squared deviation ratio), который характеризуется как среднее значение отношения остатков модели к дисперсии прогноза (Kerry et al., 2007, Webster et al., 2007)

$$MSDR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(p_i - o_i)^2}{\sigma^2} \quad (21)$$

Коэффициент детерминации использовался как для оценки регрессионных моделей и получения значений доли объясненной дисперсии, так и для оценки точности пространственной интерполяции после процедуры перекрестной проверки.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (22)$$

где $\bar{b}$ среднее значение наблюдаемых переменных

Показатель ME используется для определения в оценках степени смещения, RMSE оценивает ошибку среднего, RVar в свою очередь является мерой соотношения дисперсий. Чем ближе к нулю находилось значение ME, а значение RMSE было меньше, тем точнее была модель. Чем ближе значение RVar к 1, тем лучше способность метода пространственной интерполяции сохранять дисперсию изучаемого показателя. Чем больше значение RPIQ, тем лучше прогнозирующая способность модели. Чем ближе к 1 было значение MSDR, тем лучше был прогноз модели (Webster et al., 2007; Oliver et al., 2014), поскольку в идеале остатки после перекрестной проверки должны равняться ошибкам прогноза.

Изменение точности методов регрессионного кригинга с множественной линейной регрессией (RK MLR) и регрессионного кригинга на главных компонентах (RK PCR) в сравнении с взятым в качестве стандарта методом ОК определялось с помощью показателя RI:

$$RI = \frac{RMSE_{OK} - RMSE_p}{RMSE_{OK}} * 100 \quad (23)$$

где $RMSE_p$ и $RMSE_{OK}$ – среднеквадратичные ошибки оцениваемого метода интерполяции и ординарного кригинга, соответственно.

Интерполированные карты подвергались разделению на однородные по почвенным свойствам зоны на основе метода нечеткой кластеризации (fuzzy clustering). Метод основан на том, что наблюдения в многомерном пространстве делятся на относительно стабильные непрерывные классы, и этим наблюдениям присваиваются непрерывные значения принадлежности к классу в диапазоне от 0 до 1. Значение членства, равное 1, обозначает наблюдения, которые точно соответствуют центроиду класса, тогда как наблюдения, которые не соответствуют центроиду, получают значения членства, зависящие от степени их близости к центроиду (McBratney et al.,

1997). Основной целью алгоритма нечеткой кластеризации является минимизация функции (Sun et al., 2012):

$$J_m(U, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c (\mu_{ij}^m) \|x_i - v_j\|^2 \quad (24)$$

где J_m - взвешенная мера квадрата расстояния между наблюдениями x_i и центроидами кластеров v_j ; U – нечеткое разделение наблюдений; n - количество наблюдений; c – количество кластеров; μ – членство наблюдения в кластере; m - показатель веса.

Определение числа кластеров, на которое будет разделено пространство признаков, осуществлялось на основе ряда критериев:

Индекс нечеткого силуэта (Fuzzy Silhouette Index, FSI). Эта величина определяет меру несхожести отдельного элемента с элементами ближайшего кластера. Высокое значение показателя FSI характеризует лучшую принадлежность элемента к определенному кластеру.

$$FSI = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{b_{pj} - a_{pj}}{\max\{a_{pj}, b_{pj}\}} \quad (25)$$

где a_{pj} – среднее расстояние от наблюдения до других наблюдений в кластере, b_{pj} – минимум среднего значения расстояния наблюдения до других наблюдений в других кластерах.

Коэффициенты разделения (Partition Coefficient (PC), Modified Partition Coefficient (MPC)) определяют минимальное количество совпадений для кластеров. Чем больше значения коэффициентов, тем лучше кластеризация.

$$PC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c \mu_{ij}^2 \quad (26)$$

$$MPC = 1 - \frac{c}{c-1} (1 - PC) \quad (27)$$

Энтропия разделения (Partition Entropy, PE) измеряет степень нечеткости конечных разделенных кластеров.

$$PE = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c \mu_{ij} \log_a \mu_{ij} \quad (28)$$

Чем ближе значение PE к 0, тем лучше разделение на кластеры. Как и в предыдущем случае, значения индекса, близкие к верхней границе, указывают на отсутствие какой-либо кластерной структуры в наборе данных или неспособность алгоритма извлечь ее.

Индекс Xie-Beni (Xie-Beni index, XB) предполагает компактность разделения между кластерами. Оптимальное количество кластеров должно минимизировать значение индекса.

$$XB(c) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c (\mu_{ik}^m) \|x_i - v_j\|^2}{n \min_{i,j} \|x_i - v_j\|^2} \quad (29)$$

Оценка сопоставления кластеров проводилась по результатам показателей общей точности и статистики каппа.

Общая точность является суммой истинных положительных и истинных отрицательных величин, разделенная на общее количество элементов, то есть:

$$\text{Общая точность} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (30)$$

где TP-истинно положительное значение, TN –истинно негативное значение, FP- ложно позитивное значение, FN –ложно негативное значение.

Статистика каппа в свою очередь, учитывает точность, которая будет получена случайно.

$$Kappa = \frac{O - E}{1 - E} \quad (31)$$

где O - наблюдаемая точность, а E - ожидаемая точность, основанная на результатах матрицы ошибок.

Интерпретация значений каппа: <0 – меньше, чем чисто случайное совпадение; 0,01 - 0,20 – слабое согласие; 0,21 - 0,40 – удовлетворительное согласие; 0,41 - 0,60 – умеренное согласие; 0,61 - 0,80 – существенное согласие; 0,80 - 0,99 – почти полное согласие (Минаев, 2020)

Расчёт и обработка характеристик цифровой модели рельефа проводились в программе SAGA GIS (Conrad et al., 2015). Статистическая обработка данных, метод главных компонент и регрессионный анализ были проведены при помощи статистической среды R (URL: <http://www.R-project.org/>). В работе учитывались замечания, предъявляемые к статистическим описаниям, принятым в почвоведении (Дмитриев, 1995; Самсонова и др., 2020) Вариограммный анализ и пространственная интерполяция проводились с помощью пакета *gstat* (Pebesma, 2004), работа с растрами - с помощью пакета *raster* языка R. Для построения некоторых графиков была использована программа MS Excel. Кластеризация проводилась с использованием пакетов *cluster*, *fclust* и *ppclust* языка R. Итоговое оформление карт было проведено при помощи геоинформационной системы QGIS (URL: <https://qgis.org/ru/site/>).

ГЛАВА 3. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ

3.1 Морфологическое описание почв государственных сортиспытательных участков

Первичное почвенное обследование Заинского ГСУ было проведено в 1939 году, последнее почвенно-агрохимическое обследование проводилось в 1987 году. Морфологическое описание почвенных разрезов, заложенных в 2011 году, приведено ниже. Разрезы 1 и 3 характеризуют южную часть участка, разрез 2 был заложен на северной части ГСУ.

Разрез 1. Координаты: N: 55°05.806', E: 52°02.218', высота: 105м

A_{пах} (0-30) – темно-серый, свежий, порошисто-зернистый, тяжелый суглинок, корни, граница ровная, переход резкий, прочноватый, твердоватый.

A₁ (30-51) – светло-серый, влажноватый, тяжелый суглинок, зернистый, прочный, твердоватый, корни, граница ровная, переход постепенный.

AB (51-66) - светло-бурый, влажноватый, тяжелый суглинок, комковато-призматический, прочный, твердоватый, граница языковатая, переход постепенный.

B₁ (66-76) – желто-бурый, влажноватый, тяжелый суглинок, призматический, граница ровная, переход постепенный, твердый, прочный.

B₂ (76-146) - желто-бурый, влажный, тяжелый суглинок, ореховато-призматический, граница ровная, переход постепенный, твердый, прочный.

BC (146-152) - желто-бурый, влажный, тяжелый суглинок, комковато-призматический, отдельная щебенка, граница ровная, переход постепенный.

C_{ca}(>152) – желто-бурый, вскипает, влажный, тяжелый суглинок, крупнокомковатый

Почва: чернозем выщелоченный среднесиловый тяжелосуглинистый на делювиальных карбонатных суглинках (рис. 8)



Рисунок 8. Выщелоченный чернозем (разрез 1) Заинского ГСУ

Разрез 2. Координаты: N=55°05.983', E=52°01.957', высота: 114 м.

A_{пах} (0-30) - темно-серый, свежий, тяжелый суглинок, зернистый, граница ровная, корни, переход резкий, твердоватый, прочноватый.

AB (30-77) - темно-серый, влажноватый, тяжелый суглинок, комковато-зернистый, прочный, корни, твердоватый, граница волнистая, переход заметный.

B₁ (77-91) - бурый, влажноватый, тяжелый суглинок, комковато-ореховатый, граница ровная, переход постепенный, прочный, твердоватый.

B_{2ca} (91-111) - желтовато-бурый, влажноватый, тяжелый суглинок, призматический, прочный, твердый, корни, вскипает, заметна щебенка, граница ровная, переход ясный.

BC_{ca} (111-134) - желто-бурый, карбонаты, влажноватый, глинистый, комковатый, твердый, граница ровная, переход ясный.

C_{ca} (от 134) - бурый с вкраплениями карбонатов, влажноватый, комковатый, глина, твердый, прочный.

Почва: чернозем выщелоченный среднесиловый тяжелосуглинистый на делювиальных карбонатных глинах (рис. 9).



Рисунок 9. Выщелоченный чернозем (разрез 2) Заинского ГСУ

Разрез 3. Координаты: N=55°05.861', E=52°02.456', высота: 104 м.

$A_{\text{пах}}$ (0-26) – темно-серый, сухой, тяжелый суглинок, порошисто-зернистый, корни, граница ровная, переход постепенный, непрочный.

A_1 (26-46) - серый, сухой, тяжелый суглинок, комковато - ореховатый, прочноватый, твердоватый, корни, граница ровная, переход постепенный

AB (46-65) - серо-бурый, свежий, глинистый, комковато-ореховатый, граница волнистая, переход постепенный, прочноватый, твердоватый.

BC_{Ca} (65-90) - коричневый, свежий, тяжелый суглинок, ореховато-призматический, прочный, твердый, щебенка, потеки гумуса, граница ровная, переход ясный.

D_{Ca} (> 90) - коричневый, влажный, супесь, бесструктурный, прочноватый, щебенка, мицелий карбонатов, вскипает.

Почва: чернозем выщелоченный среднемощный тяжелосуглинистый на делювиальных суглинках с подстиланием аллювиально-делювиальных отложений (рис. 10).



Рисунок 10. Выщелоченный чернозем (разрез 3) Заинского ГСУ

Морфологическое описание показывает, что почвы Заинского ГСУ относятся к черноземам выщелоченным на делювиальных породах с подстилайением аллювиальных отложений в южной части ГСУ. По классификации 2004 года почвы относятся к отделу аккумулятивно-гумусовых почв, тип агрочерноземы глинисто иллювиальные. Мощность горизонтов A_1+AB наибольшая в разрезе 2, расположенном на северной части ГСУ. При движении к южной части участка мощность горизонтов A_1+AB уменьшается. Аналогичное поведение наблюдается также для глубины залегания карбонатов, наиболее глубокого карбонаты залегают в северной части ГСУ, тогда как в южной части глубина залегания карбонатов уменьшается.

В Арском ГСУ первичное обследование почв датируется 1953 годом, последнее почвенно-агрохимическое обследование также проводилось в 1987 году. Ниже представлено морфологическое описание двух разрезов 2011 года, которые представляют северную и южную часть ГСУ.

Разрез 1. Координаты: N: 56°06.946', E:49°46.431', высота:167м.

$A_{пах}$ (0-22), темно-серый, мокрый, очень мягкий, непрочный, переход резкий, граница волнистая, тяжелый суглинок, корни, комковато-зернистый.

B_1 (22-52), светло-бурый, потеки гумуса, кремнеземистая присыпка, корни, тяжелый суглинок, свежий, комковато-ореховатый, твердоватый, прочноватый, переход постепенный, граница не выражена.

B_2 (52-110), бурый, кремнеземистой присыпки меньше, тяжелый суглинок, ореховато-призматический, твердоватый, прочноватый, потеки гумуса, переход постепенный, граница волнистая, свежий,

BC (110-134), желто-бурый, глинистый, крупноореховато-крупнопризматический, переход постепенный, граница волнистая.

C (> 134), желтовато-бурая делювиальная глина, локально вскипает

Почва: светло-серая лесная среднemocная тяжелосуглинистая на делювиальных глинах (рис. 11).



Рисунок 11. Светло-серая лесная почва (разрез 1) Арского ГСУ

Разрез 3. Координаты: N: 56°06.445', E: 49°46.423', высота: 165 м.

$A_{\text{пах}}$ (0-26), темно-серый, мокрый, тяжелый суглинок, комковато-зернистый, корни, непрочный, граница ровная, переход резкий.

B_1 (26-62), светло-бурый, кремнеземистая присыпка, тяжелый суглинок, комковато-ореховатый, твердоватый прочноватый, граница волнистая, переход постепенный, потеки гумуса, свежий.

B₂ (62-110), бурый, тяжелый суглинок, комковато-призматический, потеки гумуса, корни, переход постепенный, граница волнистая, твердоватый, прочноватый, свежий.

BC (110-125), желтовато-бурый, комковатый, тяжелый суглинок, граница волнистая, переход постепенный, свежий.

C (> 125), желто-бурый делювиальный суглинок

Почва: светло-серая лесная среднemocная тяжелосуглинистая на делювиальных суглинках (рис. 12).



Рисунок 12. Светло-серая лесная почва (разрез 3) Арского ГСУ

Из морфологического описания представленных разрезов видно, что они характеризуют светло-серые лесные почвы на делювиальных отложениях. По классификации 2004 года они относятся к отделу текстурно-дифференцированных почв, тип агродерново-подзолистые почвы. Из-за малой мощности гумусового горизонта не удастся оценить изменение его мощности, поскольку гумусовый горизонт полностью превращен в горизонт A_{пах}, также здесь происходит припашка нижележащего переходного и/или иллювиального горизонта. Тем не менее, стоит отметить, что благодаря расположению участка на водораздельном слабopологом склоне, изменения в мощности гумусового горизонта выражены не так ярко как в Заинском ГСУ.

3.2 Изменение физико-химических свойств почв по профилю

Данные по содержанию элементов питания и кислотности по горизонтам почв представлены в таблице 4. Для анализа были использованы лишь горизонты до середины почвенного профиля, тем не менее результаты исследования показывают, что почвенные свойства закономерно изменяются вниз по профилю.

Таблица 4

Содержание элементов питания и кислотность почв по горизонтам

Номер разреза	Горизонт	Мощность, см	Гумус, %	Азот вал, %	Азот лг, мг/кг	Фосфор подв, мг/кг	Калий подв, мг/кг	pH водн.	pH сол.
Заинский ГСУ									
Разрез 1	A _{пах}	0-10	7,4	0,33	132	408	170	6,1	5,0
	A _{пах}	10-30	6,9	0,31	115	480	170	5,9	5,0
	A	30-51	4,0	0,14	64	24	90	6,4	5,3
	AB	51-66	1,6	0,10	47	48	80	6,5	5,1
Разрез 2	A _{пах}	0-10	7,0	0,32	120	716	300	6,1	5,0
	A _{пах}	0-30	6,9	0,25	126	760	300	5,9	5,0
	AB	30-77	3,5	0,16	64	100	150	6,6	5,4
Разрез 3	A _{пах}	0-10	6,7	0,31	126	472	260	6	5,1
	A _{пах}	0-26	6,2	0,32	120	460	320	6,1	5,0
	A	26-46	5,4	0,22	92	460	140	6,4	5,2
	AB	46-65	2,9	0,09	48	200	140	7	5,8
Арский ГСУ									
Разрез 1	A _{пах}	0-10	3,6	0,34	81	826	460	7,8	6,7
	A _{пах}	10-22	3,5	0,37	81	812	480	7,3	6,7
	B ₁	22-52	0,8	0,15	20	283	210	6,1	4,7
Разрез 2	A _{пах}	0-10	3,3	0,35	81	634	170	7,4	6,6
	A _{пах}	10-29	3,6	0,28	71	677	210	7,3	6,6
	A ₂	29-41	1,0	0,14	30	250	220	6,9	5,4
Разрез 3	A _{пах}	0-10	3,3	0,31	86	589	240	7,1	6,4
	A _{пах}	10-26	3,1	0,32	82	572	240	7,3	6,3
	B ₁	26-62	0,6	0,14	20	329	220	6,7	5,1

Максимальное содержание биофильных элементов и гумуса наблюдается в верхних горизонтах почв, при движении вниз по профилю их концентрация снижается. Стоит отметить, что в Заинском ГСУ значения подвижного фосфора по профилю почв несколько отличаются от значений агрохимического обследования, поскольку для разрезов подвижный фосфор определялся по методу Труога. Метод Труога извлекает такие же формы фосфатов, что и метод Чирикова, который был использован для

агрохимических образцов. Однако, обработка почв 0,002н серной кислотой, которая используется в методе Труога, приводит к несколько большему извлечению фосфора из почв, чем обработка 0,5н уксусной кислотой, используемой в методе Чирикова (Гинзбург, 1975; Аверкина, 2012). Пахотный горизонт почв Заинского ГСУ содержит подвижный фосфор в пределах от 408 до 716 мг/кг. Различие в содержании подвижного фосфора между естественной почвой и после внесения удобрений можно заметить в разрезе 1, где в пахотных горизонтах среднее содержание подвижного фосфора составляет 444 мг/кг, а в горизонте А его содержание падает до 24 мг/кг почвы. В Арском ГСУ для определения подвижного фосфора горизонтов почв использовался метода Кирсанова. Значения подвижного фосфора в пахотном горизонте этого ГСУ варьируют в пределах 572-826 мг/кг. При движении вниз по профилю содержание подвижного фосфора в почвах Заинского и Арского ГСУ резко снижается.

Подвижный калий в горизонтах почв двух ГСУ был определен по методу Масловой, который дает сопоставимые с методом Чирикова результаты. К примеру, многолетние исследования Якименко В.Н. на пахотных почвах лесостепи (черноземы и серые лесные) Западной Сибири показали, что оба метода представляют снижение результатов при дефицитном балансе калия, а также накопление в случае длительного использования повышенных доз калийных удобрений (Якименко, 2009). Различия в результатах наблюдаются при сравнении метода Масловой с методом Кирсанова. К примеру, Никитина с соавт. отмечают, что при сопоставлении результатов определения подвижного калия в среднем за 15 лет на дерново-подзолистых почвах различного ГМС 1 М уксусно-аммонийная вытяжка (метод Масловой) извлекает калия в среднем в 1,5 раза больше чем 0,2 М соляно-кислая (метод Кирсанова) (Никитина и др., 2013). Тем не менее, при отсутствии задачи сопоставления результатов двух методов, данные по содержанию подвижного калия по горизонтам почв ГСУ можно использовать для интерпретации его профильного распределения. В

пахотных горизонтах почв Заинского ГСУ подвижный калий изменяется в пределах 170-320 мг/кг, в пахотных горизонтах Арского ГСУ - варьирует в пределах 170-480 мг/кг. Вниз по профилю содержание подвижного калия в почвах Заинского ГСУ снижается более резко, чем в почвах Арского ГСУ.

Результаты анализа физико-химических свойств почв двух ГСУ представлены в таблице 5. Почвенные свойства распределяются закономерно для черноземов в случае Заинского ГСУ и серых лесных и дерново-подзолистых почв в случае Арского ГСУ.

Таблица 5

Физико-химические свойства почв ГСУ

Раз-рез	Гори-зонт	ЕКО	S	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Н _г	V, %	Раз-рез	Гори-зонт	ЕКО	S	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Н _г	V, %
		ммошь (экв)/100 гр								ммошь (экв)/100 гр					
Заинский ГСУ								Арский ГСУ							
1	A _{пах}	41,0	40,2	35,1	4,8	8,5	83	1	A _{пах}	37,4	32,2	20,6	4,2	1,0	97
	A	38,2	29,9	26,4	3,0	4,4	87		B ₁	40,2	25,8	21,1	2,3	3,7	87
	AB	37,2	26,8	24,3	2,0	3,1	90		B ₂	34,4	26,1	20,4	3,6	9,0	74
	B ₁	35,8	25,1	23,1	2,0	2,5	91		BC	30,2	26,4	18,1	2,3	7,5	78
	B ₂	30,8	25,0	23,8	2,0	2	93		C	32,9	27,7	19,2	2,3	10,7	72
	BC	29,6	24,9	20	1,4	2,3	92	A _{пах}	32,0	28,2	20,7	2,0	1,3	96	
	C _{са}	-	-	-	-	-		A ₂ B	30,8	23,0	20,2	4,9	2,1	92	
2	A _{пах}	42,2	40,7	33,0	5,1	7,7	84	2	B ₁	36,8	28,2	24,3	6,8	2,5	92
	AB	37,2	36,5	27,4	3,0	3,7	91		B ₂	35,4	28,8	21,5	1,1	3,4	89
	B ₁	34,8	34,7	25,3	2,0	2,1	94		BC	32,8	28,8	18,1	9,2	3,5	89
	B _{2са}	-	-	-	-	-			C	31,6	25,6	22,6	5,7	3,6	88
	BC _{са}	-	-	-	-	-			A _{пах}	30,4	22,4	17,2	2,5	1,9	92
	C _{са}	-	-	-	-	-		B ₁	33,6	26,4	19,2	6,1	2,0	93	
	3	A _{пах}	43,8	42,4	33,9	8,8	8,7	83	3	B ₂	34,2	26,7	22,3	5,6	4,7
A		40,2	40,0	29,5	6,1	6	87	BC		33,8	35,2	25,2	7,7	5,0	87
AB		35.1	30.8	25.3	4.9	2.5	92	C		31.6	28.9	24.3	4.0	4.6	86

Среднее значение ЕКО для пахотного горизонта почв Арского ГСУ составит 33,2 ммошь (экв)/100 гр, для почв Заинского ГСУ – 42,3 ммошь (экв)/100 гр. В Заинском ГСУ сумма обменных оснований (S), так же как значения ЕКО и катионов Ca²⁺ и Mg²⁺, снижается вниз по профилю. В Арском ГСУ катионы Ca²⁺ и Mg²⁺, также как и другие показатели катионнообменной способности (ЕКО, S), равномерно изменяются вниз по профилю в разрезе 1. В южной части поля доля Ca²⁺ и Mg²⁺ в почвенном поглощающем комплексе (ППК) возрастает вниз по профилю (разрез 3). Согласно таблице 4 почвы

Заинского ГСУ относятся к среднекислым ($pH_{\text{сол}}=5,0$), а почвы Арского ГСУ имеют нейтральную реакцию среды ($pH_{\text{сол}}>6,0$). Значения гидролитической кислотности (H_f) также указывают на то, что пахотные горизонты почв Заинского ГСУ содержат в составе ППК больше ионов водорода, чем пахотные горизонты почв Арского ГСУ, на территории которого, вероятно, было проведено известкование. Однако, степень насыщенности основаниями (V) почв Заинского ГСУ все же высокая ($> 80\%$) и возрастает вниз по профилю. В Арском ГСУ наблюдается обратная картина, степень насыщенности максимальная в пахотных горизонтах ($>95\%$), к низу она снижается до 72-88%.

Таблица 6

Гранулометрический состав почв ГСУ

Номер разреза	Гори- зонт, см	Мощ- ность, см	Содержание фракций элемент. почвенных частиц (%) диаметром (мм)							
			1-0,25	0,25- 0,05	0,05- 0,01	0,01- 0,005	0,005- 0,001	<0.001	<0.01	>0.01
			песок		пыль			ил	физ. глина	физ. песок
			крупн.и средн.	мелк.	крупн.	средн.	мелк.			
Заинский ГСУ										
Разрез 1	A _{пах}	0-10	0,76	18,82	26,63	7,42	15,79	30,58	53,79	46,21
	A _{пах}	10-30	0,14	25,54	18,11	6,38	21,04	28,79	56,21	43,79
	A	30-51	1,08	28,15	22,73	6,37	9,94	31,73	48,04	51,96
	AB	51-66	1,79	31,08	14,58	7,66	10,28	34,61	52,55	47,45
	B ₁	66-76	1,14	39,80	13,62	6,97	9,77	28,7	45,44	54,56
	B ₂	76-146	0,19	30,33	16,74	5,30	15,53	31,9	52,74	47,26
	BC	146-152	0,87	23,14	18,72	4,92	24,01	28,34	57,27	42,73
	C _{Ca}	>152	0,27	15,81	23,67	6,56	14,12	39,57	60,25	39,75
Разрез 2	A _{пах}	0-10	0,17	8,03	28,03	7,86	15,84	40,07	63,77	36,23
	A _{пах}	10-30	0,97	5,29	27,80	12,60	12,34	40,99	65,03	34,97
	AB	30-77	0,2	3,27	30,26	12,46	10,37	43,44	66,27	33,37
	B ₁	77-91	0,83	5,83	28,61	8,30	12,93	43,5	64,73	35,27
	B _{2Ca}	91-111	0,08	3,62	31,63	14,63	7,82	42,22	64,67	35,33
	BC _{Ca}	111-134	0,09	9,40	27,66	16,37	12,13	34,34	62,85	37,15
	C _{ca}	>134	0,97	5,32	26,79	8,02	13,64	45.25	66,91	33,09

Продолжение таблицы 6

Арский ГСУ										
Разрез 1	A _{пах}	0-10	0,11	3,95	41,06	18,22	7,79	28,87	54,88	45,12
	A _{пах}	10-20	0,12	4,14	42,81	15,74	10,86	26,33	52,93	47,07
	B ₁	22-52	0,04	2,07	47,66	13,75	8,45	28,03	50,23	49,77
	B ₂	52-110	0,10	1,80	40,45	5,72	10,72	41,18	57,65	42,35
	BC	110-134	0,04	3,07	46,03	5,88	14,64	30,34	50,86	49,14
	C	>134	0,02	0,82	41,08	8,60	9,34	40,14	58,08	41,92
Разрез 2	A _{пах}	0-10	0,08	4,81	43,82	12,56	16,14	22,6	51,30	48,70
	A _{пах}	10-29	0,02	5,27	40,90	12,85	15,33	25,53	52,81	47,19
	A ₂ B	29-41	0,03	4,16	40,39	4,84	10,56	40,02	55,42	44,58
	B ₁	41-76	0,03	8,18	32,20	8,69	8,63	42,27	59,59	40,11
	B ₂	76-112	0,03	1,82	41,11	5,98	11,17	39,90	57,05	42,95
	BC	112-132	0,04	2,21	44,75	4,24	9,16	39,60	53,00	47,00
	C	>132	0,02	1,18	33,83	9,70	11,38	43,89	64,97	35,03

Результаты определения гранулометрического состава, представленные в таблице 6, показывают, что почвы Заинского ГСУ характеризуются как тяжелосуглинистые и легкоглинистые крупнопылевато-иловатые, а почвы Арского ГСУ определяются как легкоглинистые иловато-крупнопылеватые. В Заинском ГСУ количество илистых частиц распределено равномерно по профилю почв, тогда как в Арском ГСУ вниз по профилю происходит увеличение илистой фракции.

В целом из вышеуказанных таблиц можно сделать вывод, что даже на примере почвенных данных не большого количества разрезов наблюдаются различия в значениях основных агрохимических и физико-химических свойств почв. Если вертикальная неоднородность почв, являющаяся по большей мере следствием эколого-генетических условий, не вызывает сомнений, то горизонтальная неоднородность почвенных свойств заслуживает особого внимания для исследования. Таким образом, показано, что в пределах сельскохозяйственного поля малой площади с таксономически однородным или близким по генезису почвенным покровом наблюдается значительная неоднородность почвенных свойств верхних пахотных горизонтов. Описание, анализ и моделирование такой неоднородности требует особого подхода и методологии.

3.3 Описательная статистика пространственных данных

Данные описательной статистики для агрохимических данных пахотного слоя почв показывают, что распределение почвенных свойств на участках достаточно неоднородно. Согласно разведочному анализу, представленному в таблице 7, содержание гумуса в почвах Заинского ГСУ характеризуется как «меньше минимального содержания» со средней вариабельностью (Методические указания....., 2003). Содержание гидролизуемого азота характеризуется как повышенное, содержание подвижных форм калия и фосфора варьирует от высоких до очень высоких значений, соответственно. Вариабельность значений подвижных форм фосфора характеризуется как очень сильная, а подвижного калия как средняя. Значения содержания физической глины имеют среднюю вариабельность, так же как и вариабельность гидролизуемого азота.

Таблица 7

Описательная статистика для пространственных данных

	Мин.	Среднее	Ошибка среднего	Медиана	Макс.	Станд. отклон.	Коэфф. вариации	Значение Шапиро-Уилка
Заинский ГСУ								
Гумус, %	4,0	6,9	0,11	6,9	8,1	0,86	13	0,93
Азот гидр., мг/кг	157	206	3,26	207	273	25,25	12	0,98*
Фосфор подв. мг/кг	111	239	9,75	218	595	75,55	32	0,86
Калий подв., мг/кг	136	176	3,12	175	27	24,17	14	0,91
Кислотность	6,0	6,4	0,06	6,2	7,8	0,46	7	0,75
Физ. глина, %	36	51	0,69	53	58	5,33	11	0,85
Арский ГСУ								
Гумус, %	2,3	3,0	0,05	3,0	4,3	0,40	13	0,97*
Азот гидр., мг/кг	78	111	2,56	109	157	18,45	17	0,95
Фосфор подв., мг/кг	148	499	24,29	486	781	175,13	35	0,95
Калий под., мг/кг	103	250	10,07	240	426	72,61	29	0,96*
Кислотность	6,3	6,9	0,05	6,9	7,7	0,38	5	0,96*
Физ. глина, %	35	41	0,25	41	44	1,81	4	0,96*

* - предположение о нормальности выполняется при уровне значимости $\alpha=0,05$

Почвы Арского ГСУ слабогумусированы, значения содержания гумуса имеют среднюю вариабельность. Поле характеризуется очень высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия и низким содержанием гидролизуемого азота. Коэффициент вариации показывает, что

вариабельность подвижных форм фосфора в Арском ГСУ очень сильная, подвижного калия - сильная, а гидролизуемого азота – средняя. Вариабельность значений рН на территории двух участков является слабой. Содержание физической глины Арского характеризуются очень слабой вариабельностью, но превышение коэффициента вариации в 2,8 раза в Заинском ГСУ статистически значимо, также значимы различия для гидролизуемого азота и подвижного калия (табл. 8).

Таблица 8

Результаты сравнения коэффициентов вариации двух ГСУ

Показатель	ГСУ	Гумус, %	Азот гидр., мг/кг	Фосфор подв., мг/кг	Калий подв., мг/кг	рН водн.	Физ, глина, %	n
Коэфф. вариации, %	Заинский	13	12	32	14	7	11	60
	Арский	13	16	35	29	6	4	52
t значение	t _{крит} =1,96	0	2,12	0,67	4,89	1,16	6,51	

Сравнение почвенных свойств Заинского и Арского ГСУ с помощью теста Манна-Уитни показало, что свойства почв двух ГСУ статистически значимо различаются ($p\text{-value} < 0.05$) при уровне значимости $\alpha=0.05$.

Особый интерес представляет распределение почвенных показателей по полям и классам почв. В приложении А указаны карты Заинского ГСУ (Рисунок А.1.) и Арского ГСУ (Рисунок А.2.) с нанесенными поверх них контурами полей и почв. В приложении Б указаны таблицы с статистическими данными по полям и почвам каждого ГСУ, на основе которых были построены графики «ящик-с-усами» почвенных свойств (приложение В).

В Заинском ГСУ наименьшее среднее значение содержания гумуса наблюдается в поле 8 (5,5 %), наибольшее среднее значение гумуса имеет поле 1 (7,8 %) (прил. Б, табл. Б.1). Содержание гумуса в полях 6-8 ниже, чем в полях 1-5 (прил. В, рис. В.1., а). Среднее значение содержания гумуса полей 1-5 изменяется в пределах 7,1 - 7,8 %, тогда так в полях 6-8 варьирует в пределах 5,5 - 6,5 %. Скорее всего, это объясняется тем, что поля 6, 7 и часть

поля 8 находятся в нижней части склона, где распространены эродированные почвы различной степени смывости.

В полях 6 - 8 снижается содержание суммы гранулометрических фракций размером $< 0,01$ мм. Снижение происходит со среднего значения 53% в поле 6 до значения 44 % в поле 8. Это говорит о том, что в этой части сортоиспытательного участка происходит "облегчение" гранулометрического состава почв (прил. В, рис. В.1., b). Увеличение доли крупных фракций в почвах на полях 7 и 8, скорее всего, связано с эрозионными процессами, вследствие которых на дневную поверхность почв могут выходить горизонты деллювиально-аллювиального происхождения, сформированные деятельностью реки Инеш, которая протекает южнее территории ГСУ.

Значения гидролизуемого азота имеют относительное равномерное распределение по полям участка (прил. В, рис. В.1., d). Исключением является лишь поле 8, в котором среднее значение гидролизуемого азота ниже по сравнению с другими полями и составляет 176 мг/кг. Панели e и f рисунка В.1. в приложении В показывают, что значения подвижных форм фосфора и калия распределены неравномерно по полям сортоиспытательного участка. Территорию ГСУ по содержанию подвижного фосфора можно условно разделить на несколько частей. Средние значения подвижных форм фосфора в полях северной части ГСУ (поля 1 и 5) выше по сравнению с остальными полями. В северной части наибольшее среднее значение подвижного фосфора отмечается для поля 1 (357 мг/кг), наименьшее среднее значение подвижного фосфора наблюдается в южной (поле 4) и юго-восточной части ГСУ (поля 6 и 7). Среднее значение подвижных форм фосфора в поле 4 составляет 186 мг/кг, в поле 6 – 216 мг/кг, в поле 7 - 187 мг/кг. Поля 3 и 4 имеют промежуточное положение по содержанию подвижных форм фосфора. Подвижный калий показывает аналогичное подвижному фосфору распределение по полям. Наименьшее среднее значение подвижного калия наблюдается в поле 4 и соответствует 160 мг/кг, а

самое высокое среднее значение подвижного калия отмечается в поле 5 (215мг/кг) (прил. В, рис. В.1., f).

Значения рН водной вытяжки исследуемой территории находятся в основном в нейтральной зоне значений (6,1 - 6,3 ед.). Исключением являются поля 7 и 8, где значения рН смещаются в слабощелочную зону. Максимальные средние значения рН находятся в полях 7 и 8 составляют 6,5 и 7,3 ед., соответственно. Объясняется это тем, что вследствие эрозионных процессов, происходящих на этих полях, локально на поверхность почв выходят карбонатосодержащие горизонты, подщелачивающие почвенный раствор.

Поскольку почвенный покров Заинского ГСУ представлен единым почвенным подтипом (рис. 7, а, табл. 2), то отображение статистических почвенных данных по классам почв проводилось в соответствии легендой почвенной карты 1987 года (прил. Б, табл. Б.2). Наибольшее среднее значение гумуса имеет класс почв 1 (7,3 %), остальные классы почв имеют близкие средние значения по содержанию гумуса (6,2 - 6,4 %). Таким образом, почвенный покров ГСУ в основном имеет слабую степень гумуссированности для соответствующего региона (Методические указания..., 2003). Классы почв 2 - 4 имеют содержание гумуса меньше минимального уровня. Это означает, что они частично утратили инертную компоненту гумуса в результате эрозионного выноса почвенных частиц, перемешивания гумусового горизонта с нижележащими горизонтами, механического выноса тонкодисперсных частиц при уборке культур (Методические указания..., 2003).

По средним значениям физической глины (сумма фракций $<0,01$ мм) гранулометрический состав почв характеризуется как тяжелосуглинистый, хотя по морфологическому описанию и легенде почвенной карты выделяются также глинистые почвы. Среднее значение содержания физической глины варьирует в пределах от 44 % (класс почв 4) до 54 % (класс почв 1) (прил. Б, табл. Б.2). На класс почв 1 приходятся наиболее

тяжелые почвы по гранулометрическому составу (прил. В, рис. В.2., b), содержание физической глины изменяется в пределах от 48% до 58%. Наиболее легкие почвы относятся к классу 4, где содержание физической глины варьирует в пределах 39 – 48%.

В почвах класса 4 наблюдается увеличение средних значений рН среды (7,2 ед.), наиболее низкие средние значения рН почвенного раствора наблюдаются в почвах класса 1 (6,3 ед.), расположенных на северной части ГСУ и не подверженных эрозионному процессу (прил. В, рис. В.2., c). Распределение значений гидролизуемого азота (прил. В, рис. В.2., d) и подвижных форм фосфора (прил. В, рис. В.2., e) по классам почв участка имеет схожие тенденции, а именно, снижение значений указанных свойств в направлении от класса почв 1 к классу почв 4. Средние значения гидролизуемых форм азота в классах почв варьируют в пределах 169 - 212 мг/кг, средние значения подвижных форм фосфора почвенных классов изменяются от 141 мг/кг до 269 мг/кг. По содержанию подвижного калия классы почв существенно не отличаются друг от друга (прил. В, рис. В.2., f). Среднее значение содержания подвижных форм калия изменяется в достаточно узком диапазоне, в пределах 163 - 180 мг/кг.

В Арском ГСУ среднее значение содержания гумуса по полям варьирует в пределах 2,6 - 3,5 % (прил. Б, табл. Б.3). Поля 5 - 8 располагаются в северной части ГСУ, тогда как поля 1 - 4 занимает южную часть Арского ГСУ (прил. А, рис. А.2.). Согласно графикам «ящик-с-усами» поля северной части участка имеют более низкое содержание гумуса, чем поля южной части ГСУ (прил. В, рис. В.3., а). Средние значения гумуса в полях 1 - 4 изменяются в пределах 3,1 - 3,5 %, содержание гумуса в полях 5 - 8 варьирует в диапазоне 2,6 - 3,1 %. Подобное различие в распределении гумуса в полях Арского ГСУ, вероятнее всего, может быть связано с геоморфологическими особенностями участка, в котором поля 1 - 4 располагаются в нижней части водораздельного слабополого склона (рис.7, б), а также с полезанимаемыми культурами и культивируемым севооборотом.

Распределение значений физической глины в полях Арского ГСУ приблизительно равномерное, по отношению к этому показателю четких различий в полях не наблюдается (прил. Б, табл. Б.3). Средние значения содержания физической глины по полям колеблются в пределах от 40 % (поле 2) до 43 % (поле 6).

Распределение содержания гидролизуемых соединений азота в полях Арского ГСУ подобно распределению гумуса. Средние значения гидролизуемого азота выше в полях 1 - 4 и изменяются в пределах от 111 мг/кг до 124 мг/кг, в северной части ГСУ (поля 5 - 8) средние значения варьируют в пределах 95- 110 мг/кг. В отличие от гидролизуемого азота значения подвижных форм фосфора и калия имеют максимальные средние значения в полях 5 и 6 (прил. Б табл. Б.3.). Подвижный фосфор в этих полях имеет средние значения 703 мг/кг и 752 мг/кг, тогда как средние значения подвижного калия здесь соответствуют 286 мг/кг и 385 мг/кг. Минимальное среднее значение в случае подвижного фосфора приходится на поле 4 (377 мг/кг) и поле 8 (381 мг/кг). В случае подвижного калия минимальные средние значения имеют поля 3 и 4 (215 мг/кг и 203 мг/кг, соответственно). Поля южной части ГСУ имеют относительно равномерное распределение значений подвижных форм фосфора и калия (прил. В, рис. В.3., е, ф).

Кислотность почв в полях Арского ГСУ характеризуются неравномерными значениями. Наибольшее среднее значение рН наблюдается в поле 5 (7,6 ед.), средние значения кислотности остальных полей варьируют в пределах 6,7 - 7,3 ед. Объяснение распределений рН водной вытяжки в Арском ГСУ сводится, скорее всего, к неравномерному внесению мелиорантов при известковании почв. Геоморфологические условия территории и морфологическое описание почв не позволяют говорить о выходе на дневную поверхность карбонатов, которые могли бы смещать значения рН водной вытяжки. Стоит также отметить, что поля южной части ГСУ приходятся в значительной степени на контур дерново-подзолистых

почв, которые имеют несколько пониженные значения рН по сравнению с преобладающими на участке серыми лесными почвами (Рисунок 7, б).

Различия по содержанию гумуса в двух типах почв Арского ГСУ незначительны (прил. Б, табл. Б.4, прил. В, рис. В.4.). Дерново-подзолистая почва имеет среднее значение 3,0 %, серая лесная - 3,1 %, соответственно. По содержанию частиц $< 0,01$ мм серая лесная почва имеет ненамного отличающиеся по сравнению с дерново-подзолистой почвой значения, различия средних значений составляет около 0,8%. Различия в средних значениях гидролизуемого азота также незначительны между почвами. В дерново-подзолистой почве среднее значение гидролизуемого азота составляет 108 мг/кг, в серой лесной почве – 111 мг/кг. Почвы Арского ГСУ имеют практически равномерное распределение подвижных форм калия. В случае подвижных форм фосфора среднее значение в серой лесной почве составляет 497 мг/кг, тогда как в дерново-подзолистой почве – 513 мг/кг. Тем не менее, результаты распределения исследуемых свойств по почвам являются предварительными, поскольку за основу выделения почв на участке были выбраны почвенные контуры в соответствии с почвенно-агрохимическим обследованием 1987 года. За прошедшее время контуры почв, как и различия по агрохимическим показателям, могли измениться вследствие сельскохозяйственной деятельности.

Таким образом, показано, что распределение почвенных свойств в Заинском и Арском ГСУ как по полям, так и по почвам является в разной степени неоднородным. Почвенные свойства Заинского ГСУ более пространственно неоднородны, чем свойств почв Арского ГСУ. Рельеф и сельскохозяйственная деятельность оказывают различное влияние на распространение почвенных свойств в пределах ГСУ.

3.4 Оценка пространственных структур почвенных свойств

Результаты тестирования пространственной автокорреляции, представленные в таблице 9, показывают, что для большинства исследуемых свойств существует положительная пространственная автокорреляция

данных. Значения p -value для всех исследуемых показателей, кроме гидролизуемого азота Заинского ГСУ, оказались ниже заданного уровня значимости ($\alpha=0,05$), нулевая гипотеза о случайности распределения данных отвергается. Статистически значимый результат статистики I Морана указывает на то, что соседние участки имеют схожие значения переменной (DiMaggio, 2014). В случае гидролизуемого азота тест I Морана определил случайное распределение значений при уровне значимости $\alpha=0,05$.

Таблица 9

Результаты тестирования пространственной автокорреляции с использованием статистики I Морана.

Переменная	I	$E(I)$	$SD(I)$	p -value
Заинский ГСУ				
Гумус, %	0,5834	-0,0169	8,0136	5,569e ⁻¹⁶
Азот гидролизуемый, мг/кг	-0,0015	-0,0169	0,2062	0,4183
Фосфор подвижный, мг/кг	0,3901	-0,0169	5,4328	2,773e ⁻⁰⁸
Калий подвижный, мг/кг	0,1969	-0,0169	2,8545	0,0022
Кислотность	0,4079	-0,0169	5,6716	7,076e ⁻⁰⁹
Физическая глина, %	0,5074	-0,0169	6,9992	1,287e ⁻¹²
Арский ГСУ				
Гумус, %	0,3647	-0,0196	4,8064	7,683e ⁻⁰⁷
Азот гидролизуемый, мг/кг	0,1884	-0,0196	2,6019	0,0064
Фосфор подвижный, мг/кг	0,5002	-0,0196	6,5008	3,995e ⁻¹¹
Калий подвижный, мг/кг	0,2458	-0,0196	3,3201	0,0004
Кислотность	0,4823	-0,0196	6,2773	1,723e ⁻¹⁰
Физическая глина, %	0,2552	-0,0196	3,4362	0,0002

Примечание: I - наблюдаемое значение статистики I Морана, $E(I)$ - ожидаемое значение статистики I Морана, $SD(I)$ - стандартное отклонение статистики I Морана, p -value - вероятность ошибки I рода при заданном уровне значимости ($\alpha=0,05$)

На рисунке 13 представлены предварительные карты пространственного распределения почвенных показателей. Карты построены без анализа

вариограмм, но они позволяют визуально оценить характер неоднородности почвенных показателей в пределах каждого ГСУ.

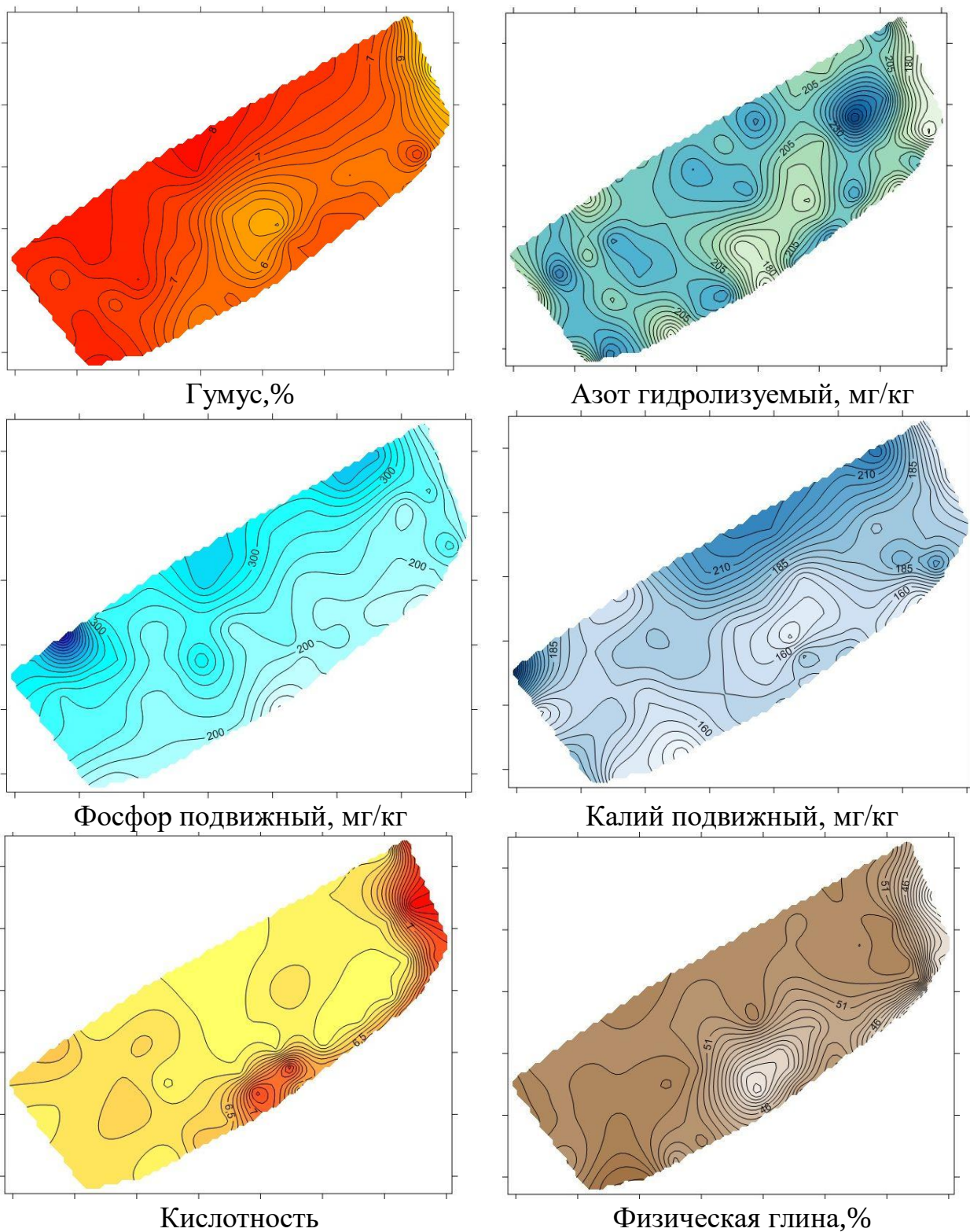
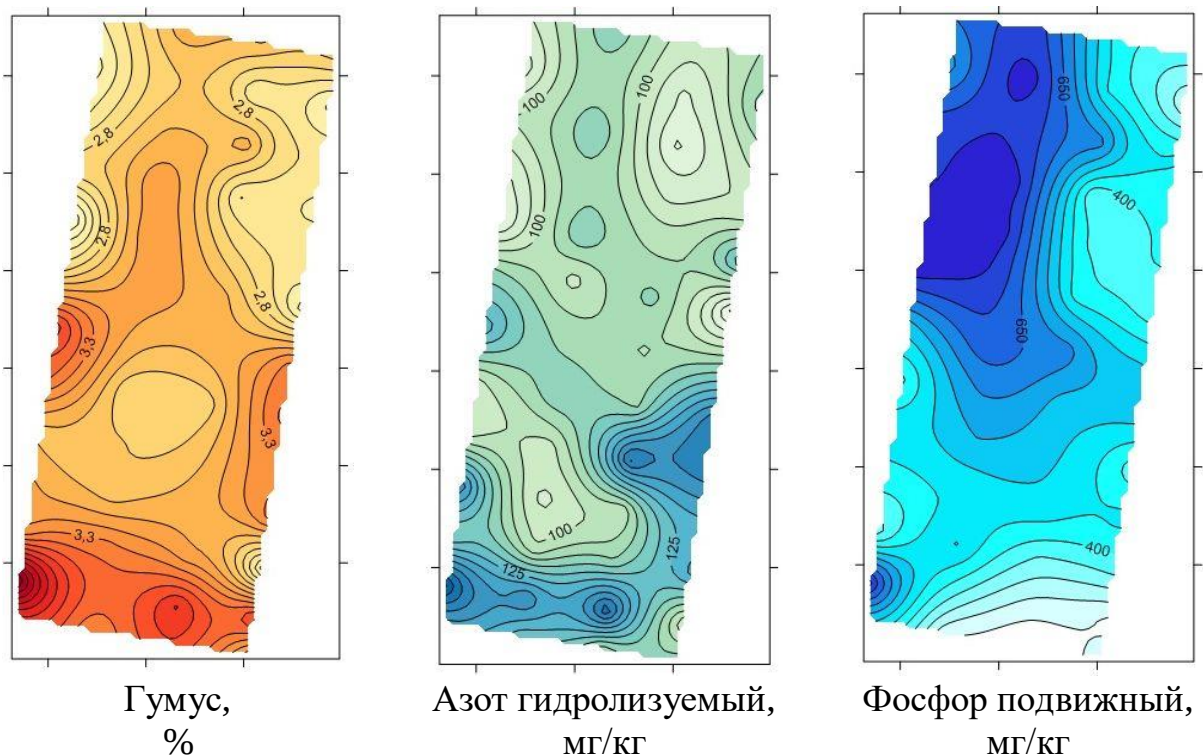


Рисунок 13. Предварительные карты распределения почвенных показателей в пределах Арского ГСУ.

Из рисунков видно, что распределение почвенных показателей в Заинском и Арском ГСУ неоднородно. Принимая во внимание преимущественное расположение ГСУ на слабовыраженных, не отличающихся резко по своим характеристикам элементах рельефа, можно предположить, что многолетняя антропогенная деятельность в виде сельскохозяйственного воздействия привела к перераспределению почвенных показателей и изменению их первоначальной пространственной неоднородности. К примеру, в пределах северно-восточной части Заинского ГСУ отчетливо выделяются пятна повышенного содержания подвижных форм фосфора и калия, такие же участки в разных частях Заинского ГСУ можно выделить для гумуса, гидролизующего азота, кислотности и физической глины. На территории Арского ГСУ также имеются участки, которые отличаются по содержанию почвенных показателей, особенно выделяются участки повышенного содержания подвижного фосфора и калия в северной части. Также отчетливо можно наблюдать различие северной и южной частей Арского ГСУ по содержанию гумуса и гидролизующего азота. Вероятно, это связано с конфигурацией участка, что сказывается на обработке полей с разделением на северные и южные зоны (рис. 14).



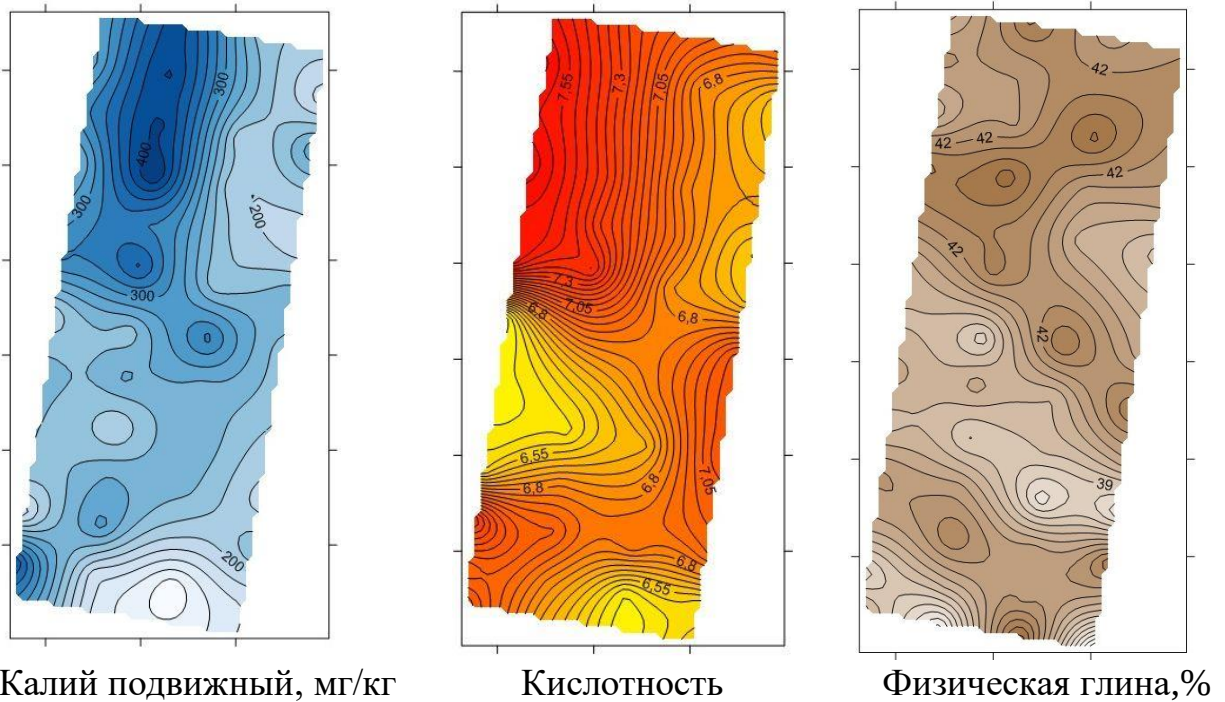


Рисунок 14. Предварительные карты распределения свойств почв Арского ГСУ.

При всей наглядности вышеуказанных карт стоит отметить, что геостатистический прогноз опирается на модели пространственной структуры данных (Webster et al., 2007). Таким образом, перед осуществлением пространственного прогноза исследуемых свойств почв была исследована их пространственная структура и оценена пространственная зависимость почвенных показателей. (Cambardella et al., 1994). Параметры теоретических моделей стандартизированных вариограмм почвенных показателей ГСУ представлены в таблице 10.

В случае Заинского ГСУ пространственная структура гумуса характеризуется геометрической анизотропией в северо-восточном направлении (45°), причиной чего может являться обработка почв. Содержание подвижного калия имеет анизотропию в направлении $67,5^\circ$ и помимо геометрической анизотропии, которая возникает при варьировании радиуса корреляции, но постоянном пороге, характеризуется также зональной анизотропией, выраженной в изменении радиуса корреляции и порога со сменой направления. Пространственная структура остальных показателей описывается изотропными вариограммами. Вариограмма

гидролизующего азота имеет форму чистого «наггет-эффекта», что указывает на случайное распределение, не зависящее от расстояния между образцами. Подобная картина часто наблюдается в случаях, когда пространственная структура проявляется на расстоянии, значительно меньшем, чем расстояние между точками опробования. Вариограмма, которая имеет форму «чистого наггет-эффекта» исключает применение метода ОК для интерполяции значений (Сахабиев и др., 2017). Показатель кислотности почв и содержания физической глины имеют схожую пространственную структуру с приблизительно одинаковыми радиусами автокорреляции (рис. 15).

Таблица 10

Параметры стандартизированных вариограмм почвенных свойств

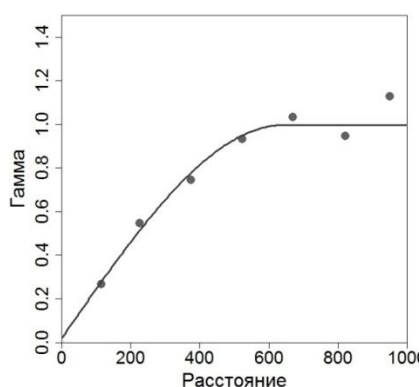
Вариограммы для ОК						
	Модель	Радиус корреляции, м; в случае тренда – после его удаления	Наггет (C ₀)	Порог (C)	C ₀ /(C), %	(C-C ₀)/C, %
Зайинский ГСУ						
Гумус, %	Sph	642	0,02	1,0	2	98
Азот гидр., мг/кг	Nug	чистый наггет	0,95	1,0	95	5
Фосфор подв., мг/кг	Sph	657	0,05	1,13	4	96
Калий подв., мг/кг	Sph	503	0,08	1,05	8	92
Кислотность	Sph	841	0,68	0,99	67	33
Физ. глина, %	Sph	791	0,58	0,99	58	42
Арский ГСУ						
Гумус, %	Тренд	1013	0,54	1,0	54	46
Азот гидр., мг/кг	Тренд	205	0,64	1,0	64	36
Фосфор подв., мг/кг	Sph	718	0,02	1,19	2	98
Калий подв., мг/кг	Sph	480	0,53	0,96	55	45
Кислотность	Sph	668	0	1,23	0	100
Физ. глина, %	Тренд	чистый наггет	0,80	1,0	80	20

* Sph – сферическая модель вариограммы, Nug – модель наггет-эффекта

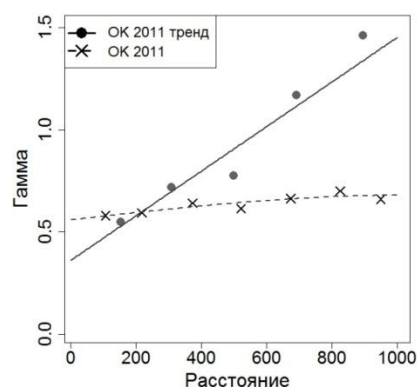
Пространственная структура содержания гумуса, гидролизующего азота а также физической глины в Арском ГСУ представлена трендами (рис. 15), которые указывают на не случайность возникновения пространственной неоднородности. Экспериментальные вариограммы в этом случае аппроксимируются линейными изотропными моделями, поскольку радиус автокорреляции этих почвенных показателей превышает размеры

исследуемого участка и вариограммы не выходят на «плато» на расстояниях в пределах ГСУ. Для сопоставления с радиусами корреляции других почвенных показателей тренды были удалены по значениям пространственных координат. В целом, взаимная корреляция большинства почвенных показателей двух ГСУ происходит примерно на близком расстоянии и составляет около 480 - 840 м. Лишь в Арском ГСУ радиус корреляции для содержания гумуса и физической глины превышает 1000 м после удаления тренда (табл. 9, рис. 15).

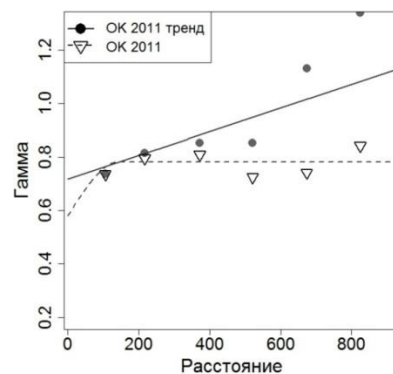
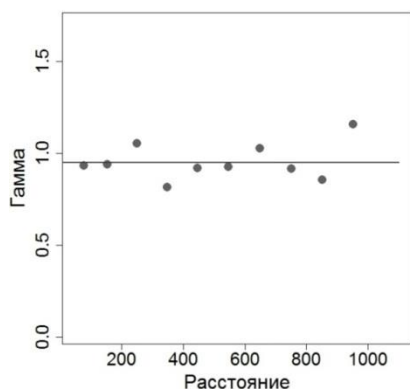
Заинский ГСУ



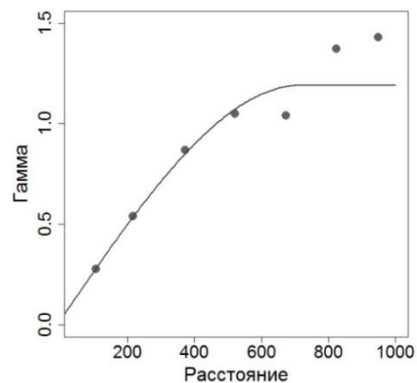
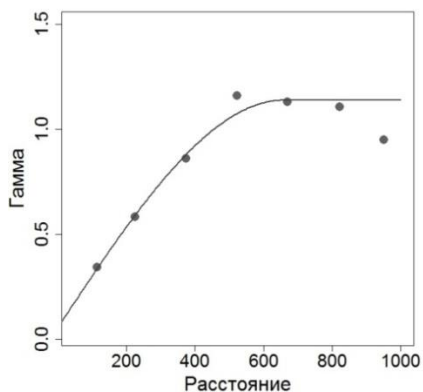
Арский ГСУ



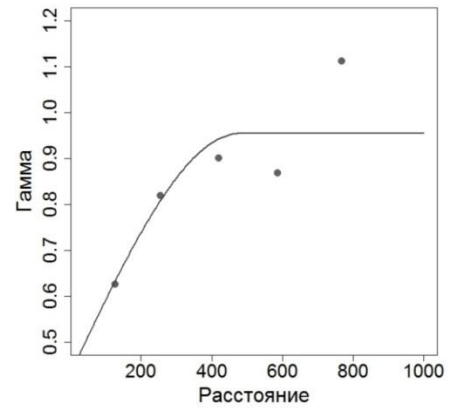
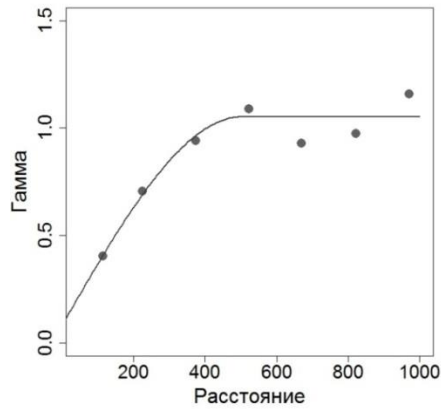
а) Гумус, %



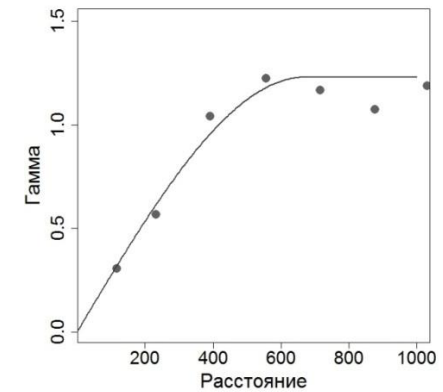
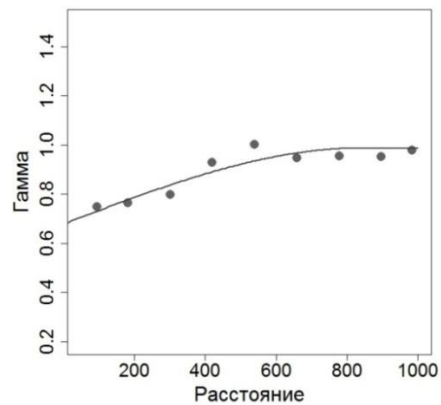
б) Азот гидролизуемый, мг/кг



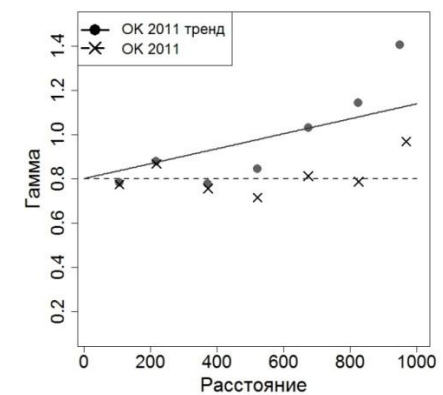
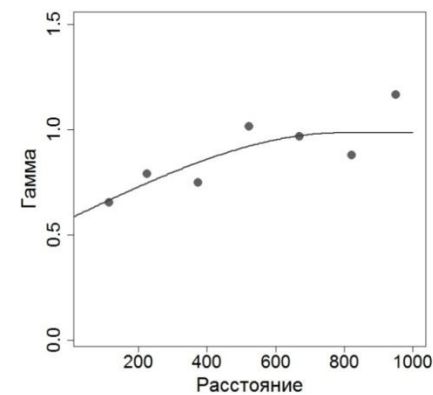
в) Фосфор подвижный, мг/кг



г) Калий подвижный, мг/кг



д) Кислотность

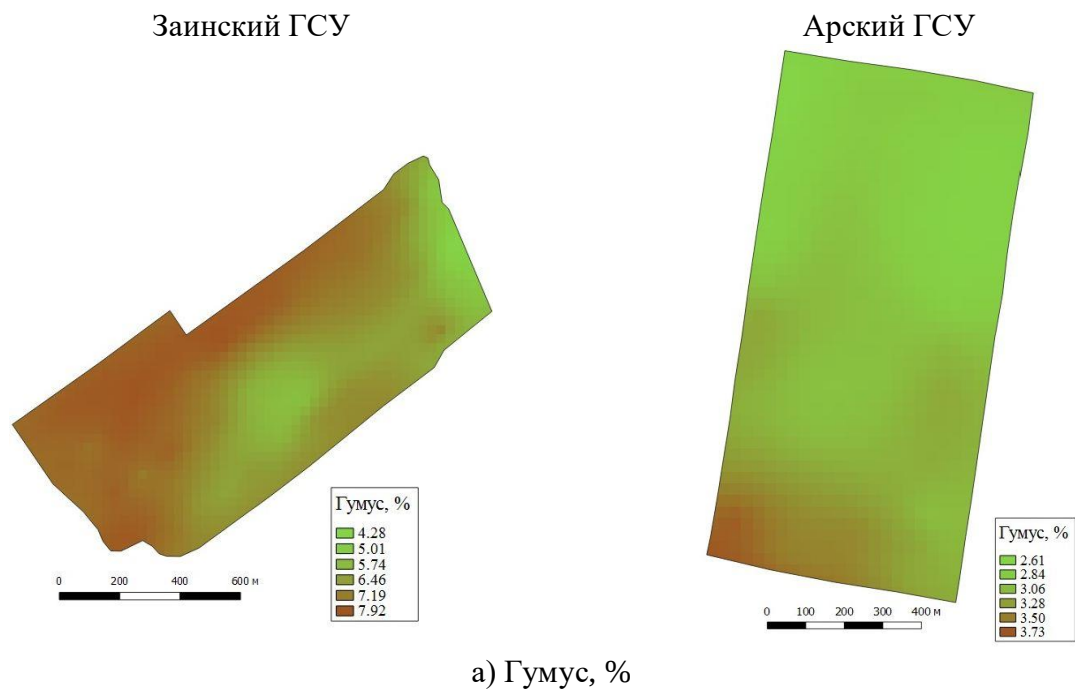


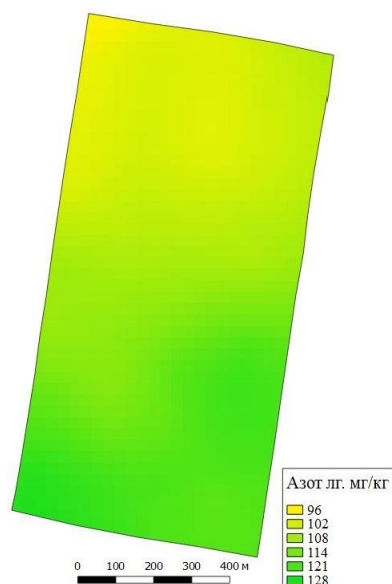
е) Физическая глина, %

Рисунок 15. Экспериментальные вариограммы стандартизированных почвенных показателей с подобранными теоретическими моделями

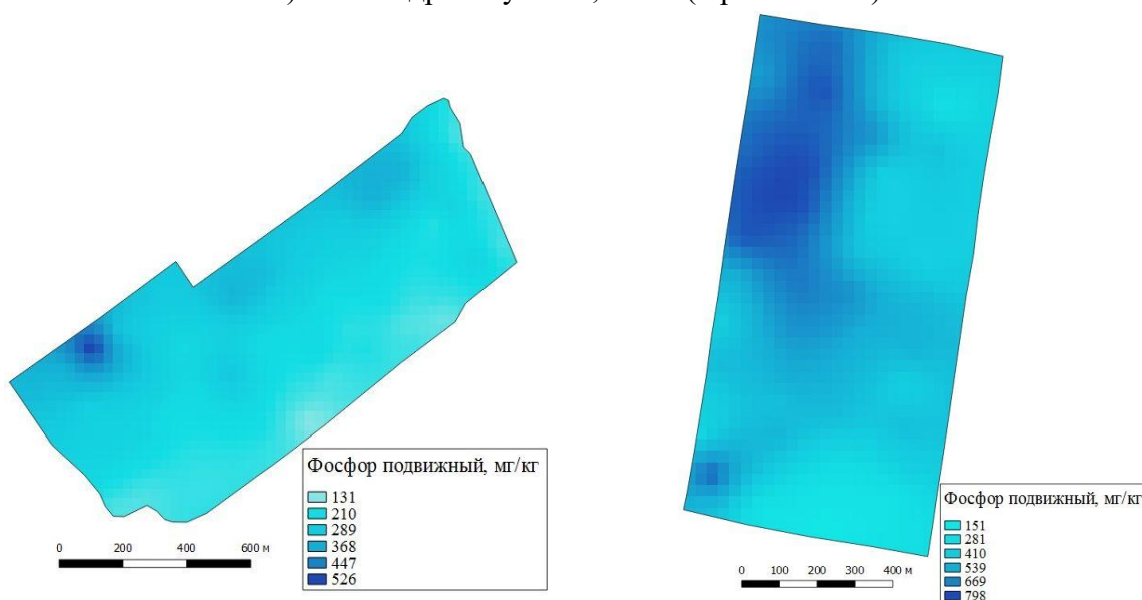
Согласно Cambardella с соавт, соотношение наггет/порог $\leq 25\%$ свидетельствует о сильной, 25-75% - умеренной и $\geq 75\%$ - о слабой пространственной зависимости показателя (Cambardella et al., 1994). Соотношение (порог–наггет)/порог также показывает долю пространственной зависимости, но в возрастающей последовательности.

Совместно они определяют общую дисперсию вариограммы. Таким образом, пространственная структура гумуса, подвижных форм фосфора и калия в Заинском ГСУ характеризуется сильной пространственной зависимостью, а структура кислотности и физической глины характеризуется умеренной автокорреляцией. Среди всех показателей Арского ГСУ, лишь содержание подвижного фосфора и показатель pH имеют сильную пространственную зависимость. Умеренная пространственная зависимость приходится на содержание подвижного калия и на остальные свойства, но после удаления тренда, зависимость физической глины после удаления тренда – слабая (Табл. 10, рис. 15). Подобранные модели вариограмм использовались в дальнейшем для пространственной интерполяции почвенных показателей методом ординарного кригинга (ОК). Ординарный кригинг является одним из наиболее распространенных геостатистических методов и часто используется для целей сравнения с другими методами пространственного моделирования (Bishop et al., 2001; Li et al., 2008). Результаты интерполяции представлены на рисунке 16.

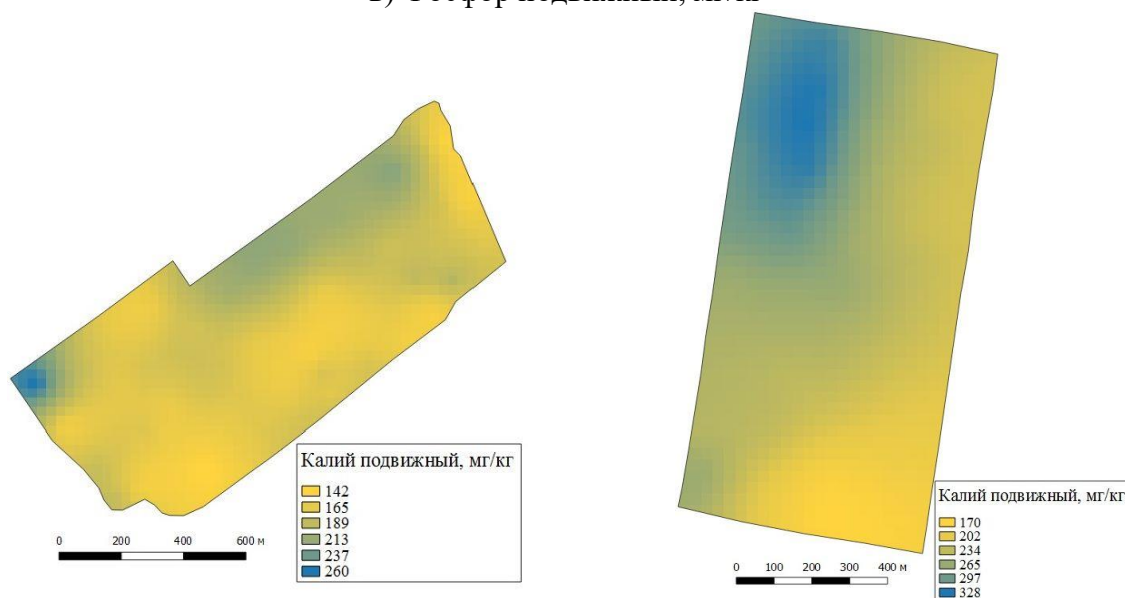




б) Азот гидролизующийся, мг/кг (Арский ГСУ)



в) Фосфор подвижный, мг/кг



г) Калий подвижный, мг/кг

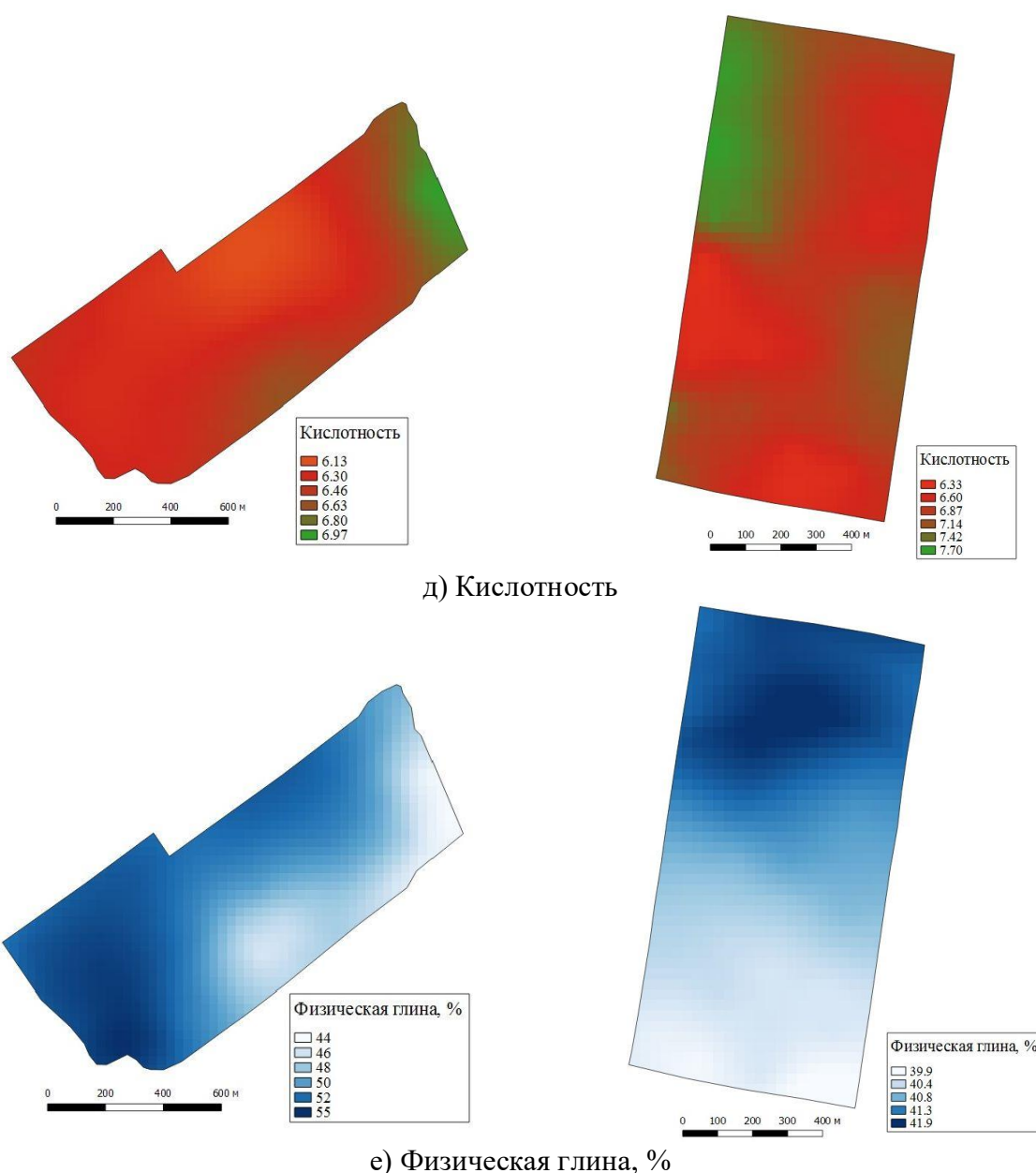


Рисунок 16. Карты пространственного прогноза свойств почв, построенные с помощью метода ординарного кригинга.

Содержание гумуса в почвах Заинского ГСУ снижается к юго-восточной части участка, более высокие значения показателей наблюдаются в северной и северо-западной части ГСУ, которые мало подвержены эрозионным процессам (рис. 16, а). Распределение физической глины также отражает влияние рельефа, облегчение ГМС наблюдается в зоне эрозионных процессов (рис. 16, е). Содержание подвижных форм калия и фосфора показывает неравномерное распределение по территории сортоиспытательного участка (рис. 16, в, г).

Почвы Арского ГСУ характеризуются более равномерным распределением содержания гумуса и физической глины, по сравнению с почвами Заинского ГСУ (рис. 16, а, е). Меньшее содержание гидролизующего азота отражается в северной части участка (рис. 16, б). Содержание подвижных форм калия и фосфора также имеют схожие картины распределения, обусловленные, вероятно, применением минеральных удобрений (рис. 16, в, г). Таким образом, помимо влияния рельефа, почвообразующих пород и других эколого-генетических условий, определяющих почвообразовательные процессы, пространственная неоднородность почвенных свойств агроландшафтов также может обуславливаться применением удобрений. К примеру, при расчете доз удобрений может не корректно учитываться пространственное распределение запасов элементов питания в почвах, что может привести к неравномерному внесению удобрений в почвы.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬЕФА НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ

4.1. Моделирование зависимости свойств почв от характеристик рельефа

Часть карт, полученных методом ординарного кригинга, отражают влияние рельефа на пространственное распределение агрохимических свойств почв государственных сортоиспытательных участков. На основе множественного линейного регрессионного анализа с использованием характеристик рельефа в качестве предикторов был оценен вклад влияния рельефа на пространственную вариабельность свойств почв.

Итоговые наилучшие регрессионные модели представлены в таблице 11. Все предикторы, указанные в регрессионных моделях, являются значимыми при уровне значимости $\alpha=0,05$. Отдельно показаны скорректированные коэффициенты детерминации (Скорр. R^2), которые указывают на количество дисперсии, объясняемой моделью. Результаты регрессионного моделирования указывают на сильные различия между двумя сортоиспытательными участками по значимости характеристик рельефа для пространственного распределения почвенных свойств. Для Заинского ГСУ наблюдается более сильная зависимость большинства агрохимических свойств от условий рельефа, что также подтверждается результатом корреляционного анализа между исследуемыми показателями и морфометрическими характеристиками рельефа (прил. Г). Преимущественное влияние на пространственное распределение свойств почв оказывают такие морфометрические величины как Southwestness (юго-западность, отражает экспозиционное положение участка), MRRTF и MRVBF (степени плоскостности водораздельных и низинных участков, соответственно), которые позволяют вычленить склоновые и равнинные участки рельефа, характеризуют направление и силу распределения вещества в ландшафте (Gallant et al., 2003). Выпуклость рельефа поверхности (Terrain

Surface Convexity) в свою очередь описывает положительную кривизну поверхности (Iwahashi et al., 2007). На примере рельефа Японии Iwahashi с соавт, отмечают, что выпуклость рельефа лучше описывала признаки низкого рельефа, например, разделение аллювиальных отложений из пойм или старых речных террас от более молодых террас. Учитывая, что Заинский ГСУ расположен в переходе от склонового участка к пойменной низине, использование выпуклости рельефа в моделях выглядит вполне разумным.

Таблица 11

Параметры моделей множественной линейной регрессии

Целевая переменная	Предиктор	Коэф. (OLS)	Скорр. R ²	Предиктор	Коэф. (OLS)	Скорр. R ²
	Заинский ГСУ			Арский ГСУ		
Гумус, %	intercept	6,18	0,53	intercept	3,38	0,25
	Southwestness	-1,16		VDCN	-0,06	
	MRRTF	0,14				
	MRVBF	-0,18				
Азот гидр., мг/кг	intercept	279,26	0,25	intercept	126,904	0,26
	Southwestness	-28,69		VDCN	-3,03	
	Stream Power	-0,05				
	Convexity	-140,85				
Фосфор подв., мг/кг	intercept	278,35	0,54	intercept	1243,80	0,35
	Valley Depth	-0,60		Terrain Ruggedness	-901,70	
	MRRTF	24,27		Mid-Slope Positon	-984,30	
	MRVBF	-13,21				
Калий подв., мг/кг.	intercept	156,35	0,16	intercept	534,37	0,30
	MRRTF	6,28		Terrain Ruggedness	-272,10	
				Mid-Slope Positon	-433,18	
Кислотность	intercept	6,40	0,51	intercept	8,71	0,40
	Southwestness	0,92		Catchment Area	0,00	
	MRRTF	-0,10		Terrain Ruggedness	-1,77	
	Convexity	1,63		Mid-Slope Positon	-2,85	
Физ. глина, %	intercept	57,80	0,48	intercept	39,77	0,13
	Plan Curvature	222,25		VDCN	0,22	
	Southwestness	-8,86				
	MRRTF	0,98				
	Convexity	-28,21				

Примечание: OLS – метод наименьших квадратов (ordinary least squares). Intersept – пересечение, свободный член регрессионной модели.

Высокие значения коэффициентов детерминации позволяют сделать вывод о значительной зависимости ряда почвенных свойств от условий рельефа. Расположение Заинского ГСУ на склоновом участке приводит к

развитию эрозионных процессов, что влияет на пространственное распределение питательных веществ и фракций гранулометрического состава. Рельефом объясняется около половины дисперсии гумуса, ГМС, кислотности почв и содержания подвижного фосфора. Малые значения коэффициентов детерминации для моделей подвижного калия и гидролизуемого азота указывают на слабое влияние рельефа на них.

Арский ГСУ находится на водоразделе и имеет более однородный рельеф, эрозионные процессы здесь выражены не так ярко как в Заинском ГСУ, поэтому в Арском ГСУ наблюдается меньшее влияние параметров рельефа на пространственное распределение агрохимических свойств (табл.11). Относительно сильная зависимость от рельефа наблюдается для содержания подвижного фосфора и кислотности ($R^2_{\text{скор.}}=0,35$ и $0,40$, соответственно). Основными характеристиками рельефа являются в этом случае параметры VDCN (относительная высота), Terrain Ruggedness (индекс неоднородности рельефа) и Mid-Slope Position (отражает относительное расположение по склону). В таблице 12 отражены морфометрические характеристики рельефа, которые имеют наибольшее влияние на пространственное распределение свойств почв Заинского и Арского ГСУ.

Таблица 12

Предикторы моделей регрессии почвенных показателей

Предиктор	Гумус	Азот гидр.	Фосфор подв.	Калий подв.	pH	Физ. глина
Заинский ГСУ						
Southwestness (юго-западность, отражает экспозиционное положение участка)	+	+			+	+
MRRTF (степень плоскостности водораздельных участков)	+		+	+	+	+
MRVBF (степень плоскостности низинных участков)	+		+			+
Stream power index (отражает эрозионные участки)		+				
Terrain surface convexity (положительная кривизна поверхности)		+			+	+
Valley depth (определяет степень глубины низин)			+			
Plan curvature (плановая кривизна местности)						+

Продолжение таблицы 12

Арский ГСУ						
VDCN (описывает высоту относительно базового уровня)	+	+				+
Terrain ruggedness index (индекс шероховатости, определяет относительную локальную расчлененность рельефа)			+	+	+	
Mid-slope position (относительное положение склона)			+	+	+	
Catchment area (определяет площадь водосбора)					+	

Таким образом, в Заинском ГСУ преимущественное влияние на распределение свойств почв оказывают морфометрические характеристики рельефа, которые вычлняют склоны и равнинные участки рельефа, а также определяют характер распределения вещества по элементам рельефа. Для Арского ГСУ в моделях регрессии участвуют параметры, которые отражают относительную высоту точек отбора, а также локальную расчленённость рельефа.

Тем не менее, из большого набора вспомогательных переменных затруднительно осуществлять поиск значимых предикторов, Как отмечает Miller с соавт., до сих пор не существует однозначного способа установления важности предикторов (Miller et al., 2015). К тому же морфометрические характеристики, рассчитанные из цифровой модели рельефа, имеют высокую мультиколлинеарность друг с другом, что ограничивает их применение в моделях MLR. Алгоритм подбора моделей с использованием проверки с параметрами VIF и AIC, применяемый в исследовании, позволяет избежать ошибок, связанных с мультиколлинеарностью. Тем не менее, параметры рельефа, исключенные из подбора из-за высокой корреляции, могут нести полезную информацию, которая позволит повысить точность пространственной интерполяции. Метод регрессии на главные компоненты (principal component regression, PCR) позволяет включить все предикторы в построение моделей и избежать мультиколлинеарности.

Методом главных компонент были получены некоррелированные компоненты, представляющие собой линейные комбинации исходных

данных. Для дальнейшего анализа в случае Заинского ГСУ были выбраны первые 7 компонент, содержащие в себе 93% информации, представленной всем набором исходных показателей (Ryazanov et al., 2016). Для пространственного моделирования показателей Арского ГСУ были выбраны первые 10 компонент с 91% объясненной дисперсии.

В таблице 13 представлены результаты регрессионного моделирования с помощью метода PCR. Для Заинского ГСУ коэффициенты детерминации, полученные при моделировании содержания гумуса, подвижных форм фосфора и физической глины приближаются к значениям, полученным методом MLR. В случае подвижных форм калия регрессия на главные компоненты показала лучшие результаты, модели гидролизуемого азота и кислотности имеют меньшие значения скорректированного R^2 , чем модели MLR. Для Арского ГСУ модели, полученные методом PCR, дают результаты близкие к моделям с использованием исходных данных. Тем не менее Исключением является модель содержания гумуса, чей скорректированный коэффициент детерминации увеличился по сравнению с моделью MLR.

Таблица 13

Параметры моделей регрессии на главные компоненты

Целевая переменная	Предиктор	Коэф, (OLS)	Скорр, R^2	Предиктор	Коэф, (OLS)	Скорр, R^2
	Заинский ГСУ			Арский ГСУ		
Гумус, %	intercept	6,86	0,52	intercept	3,04	0,37
	PC1	0,09		PC1	-0,03	
	PC2	0,18		PC2	0,04	
				PC3	-0,08	
				PC4	-0,05	
				PC5	-0,04	
				PC6	-0,07	
Азот гидр., мг/ кг	intercept	205,80	0,06	intercept	110,76	0,25
	PC2	2,22		PC1	-1,95	
				PC2	2,45	
				PC3	-2,18	
				PC10	-5,71	

Продолжение таблицы 13

Фосфор подв., мг/ кг	intercept	238,96	0,54	intercept	499,44	0,24
	PC1	10,88		PC1	17,31	
	PC2	5,94		PC2	-25,11	
	PC3	-15,36		PC5	-25,83	
	PC5	-15,87				
Калий подв., мг/ кг	intercept	176,07	0,23	intercept	249,80	0,27
	PC1	3,20		PC1	5,70	
	PC7	-7,32		PC2	-9,84	
				PC4	-14,09	
				PC6	10,91	
Кислотность	intercept	6,41	0,37	intercept	6,93	0,35
	PC2	-0,06		PC1	0,03	
	PC3	0,05		PC3	0,05	
	PC4	0,07		PC4	-0,10	
	PC5	-0,10				
	PC7	-0,14				
Физ. глина, %	intercept	50,72	0,49	intercept	40,92	0,12
	PC1	0,40		PC1	0,16	
	PC2	0,99		PC2	-0,17	
	PC4	-1,14		PC3	0,19	

Таким образом, учитывая результаты двух типов регрессионных моделей, можно отметить, что в Заинском ГСУ с рельефом наиболее связано содержание гумуса ($R^2_{\text{скор. (MLR)}} = 0,53$), подвижного фосфора ($R^2_{\text{скор. (MLR)}} = 0,54$), физической глины ($R^2_{\text{скор. (PCR)}} = 0,49$) и кислотность ($R^2_{\text{скор. (MLR)}} = 0,51$). В Арском ГСУ наибольшие значения скорректированного коэффициента детерминации наблюдается для кислотности ($R^2_{\text{скор. (MLR)}} = 0,40$). Модели остальных показателей, кроме физической глины, имеют значения $R^2_{\text{скор.}}$ в пределах 0,26-0,37.

В целом, в Заинском ГСУ морфометрические характеристики рельефа объясняют до половины пространственной вариабельности почвенных показателей, а в Арском ГСУ - менее 50%. Для полного описания пространственного распределения почвенных свойств к полученным моделям регрессии следует добавить автокорреляцию почвенных показателей, оставшуюся после описания детерминированной части вариабельности. Для этого был проведен вариограммный анализ остатков регрессионных моделей, который позволил описать пространственную

зависимость стохастической части вариабельности почвенных свойств после применения различных регрессионных моделей (табл. 14).

Таблица 14

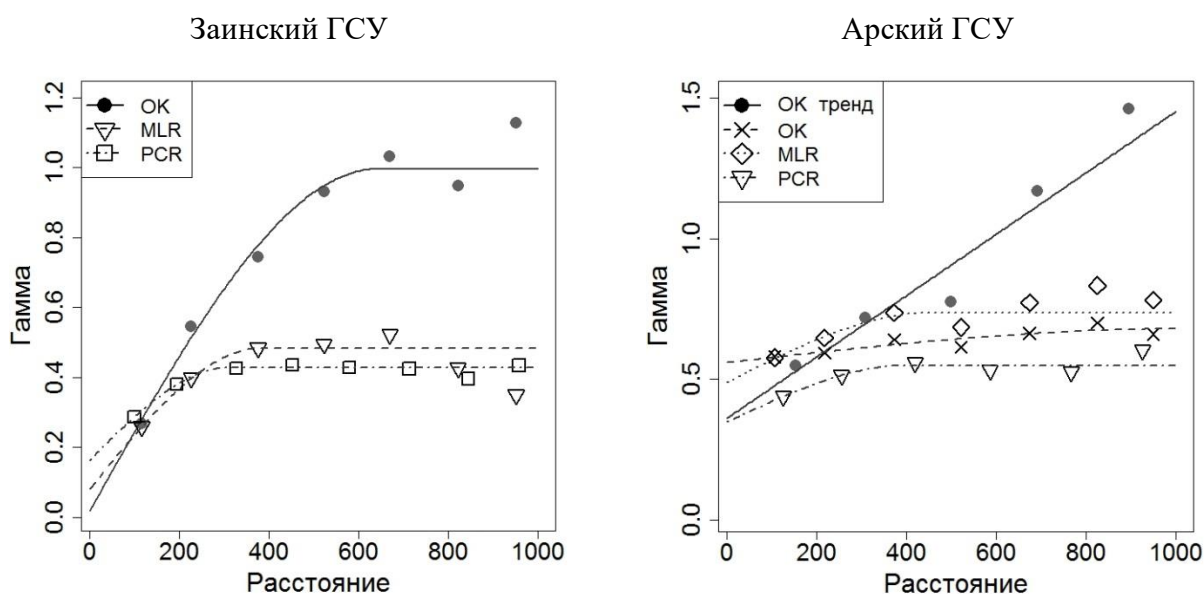
Параметры теоретических вариограмм остатков моделей регрессии

	Мо- дель	Радиус автокорреляции (Ранг)	Наггет (C ₀)	Част. порог (C ₁)	Порог (C ₀ +C ₁)	C ₀ /(C ₀ +C ₁), %
MLR (Заинский ГСУ)						
Гумус, %	Sph	383	0,08	0,40	0,48	17
Азот гидр., мг/кг	Nug	-	0,67	-	-	-
Фосфор подв., мг/кг	Sph	270	0,13	0,30	0,43	30
Калий подв., мг/кг	Sph	338	0,01	0,79	0,80	1
Кислотность	Sph	1278	0,38	0,14	0,52	73
Физ. глина, %	Sph	654	0,35	0,15	0,50	70
PCR (Заинский ГСУ)						
Гумус, %	Sph	307	0,16	0,26	0,42	38
Азот гидр., мг/кг	Nug	-	0,89	-	-	-
Фосфор подв., мг/кг	Sph	221	0,01	0,39	0,40	3
Калий подв., мг/кг	Sph	390	0,02	0,72	0,74	3
Кислотность	Тренд	4159	0,44	0,40	0,84	52
Физ. глина, %	Nug	-	0,48	-	-	-
MLR (Арский ГСУ)						
Гумус, %	Sph	459	0,49	0,25	0,74	66
Азот гидр., мг/кг	Sph	151	0,62	0,14	0,76	81
Фосфор подв., мг/кг	Sph	817	0,20	0,59	0,79	25
Калий подв., мг/кг	Sph	358	0,29	0,37	0,66	44
Кислотность	Sph	549	0,15	0,55	0,70	21
Физ. глина, %	Nug	-	0,79	-	-	-
PCR (Арский ГСУ)						
Гумус, %	Sph	402	0,35	0,20	0,55	63
Азот гидр., мг/кг	Sph	209	0,59	0,11	0,70	84
Фосфор подв., мг/кг	Sph	521	0,14	0,54	0,68	21
Калий подв.	Sph	438	0,42	0,27	0,69	60
Кислотность	Sph	504	0,14	0,62	0,76	18
Физ. глина, %	Nug	-	0,78	-	-	-

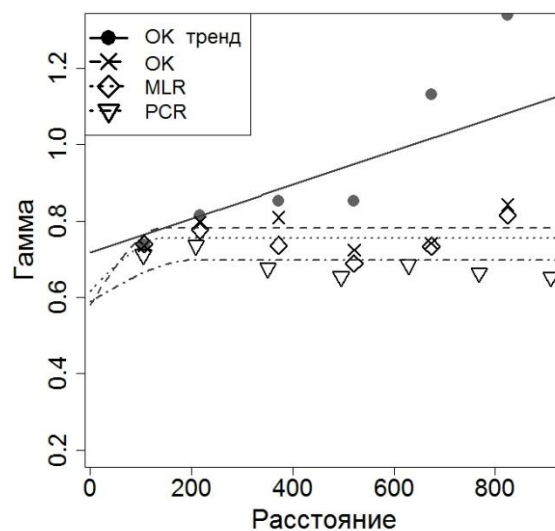
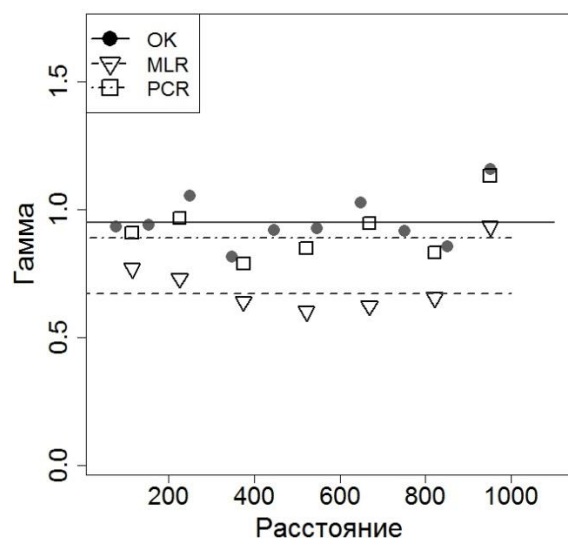
Визуализация вариограммного анализа представлена на рисунке 17. Для наглядности совместно с вариограммами остатков моделей регрессии представлены вариограммы ординарного кригинга. Такое размещение вариограмм позволяет наглядно продемонстрировать изменение

пространственной зависимости данных после применения техник регрессионного моделирования.

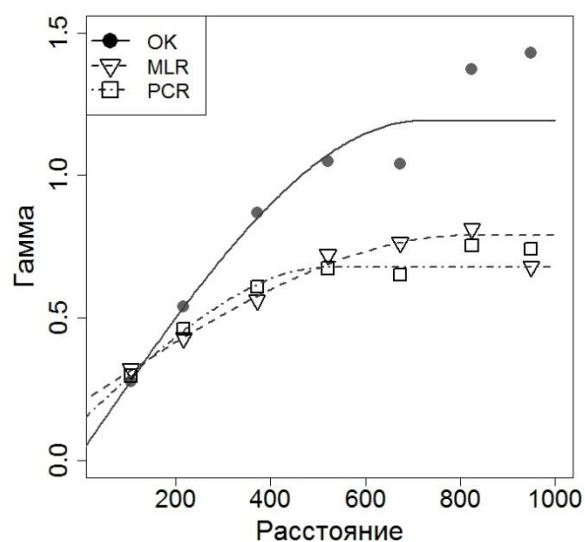
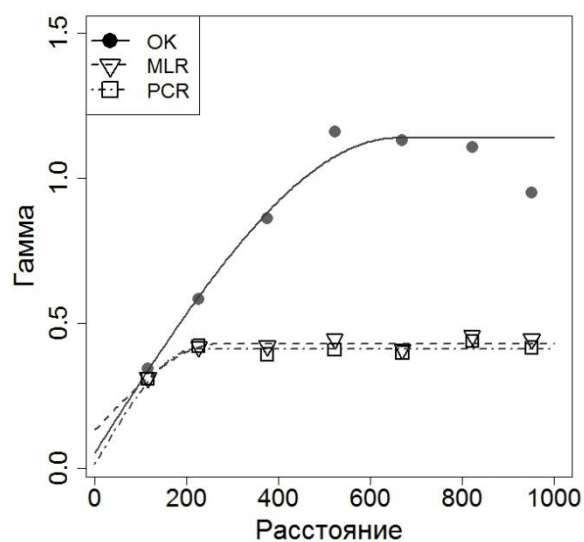
Вариограммы остатков моделей показывают значительное изменение пространственной зависимости почвенных свойств по сравнению с вариограммами исходных данных. В случае Заинского ГСУ пространственная автокорреляция физической глины определяется параметрами рельефа. Это видно из экспериментальной вариограммы остатков регрессионного моделирования, которая аппроксимируется «нагет моделью». Однако, для этого показателя значение наггета остается высоким, то есть присутствует неучтенная дисперсия. Вариограммы остатков регрессии гумуса и подвижного фосфора показывают значительное уменьшение порога. В случае подвижного калия вариограммы остатков регрессии имеют высокий порог, что говорит о возможном наличии факторов помимо рельефа, которые могут оказывать влияние на распределение подвижного калия. В случае кислотности регрессионные модели снизили значения порога, однако характеристики рельефа не смогли полностью описать пространственную зависимость этого показателя, что привело к возникновению тренда в остатках модели PCR, который исчезает при использовании множественной линейной регрессии (рис. 17).



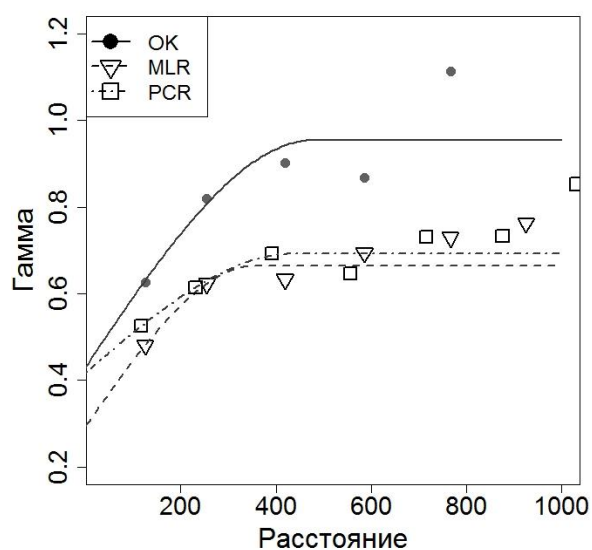
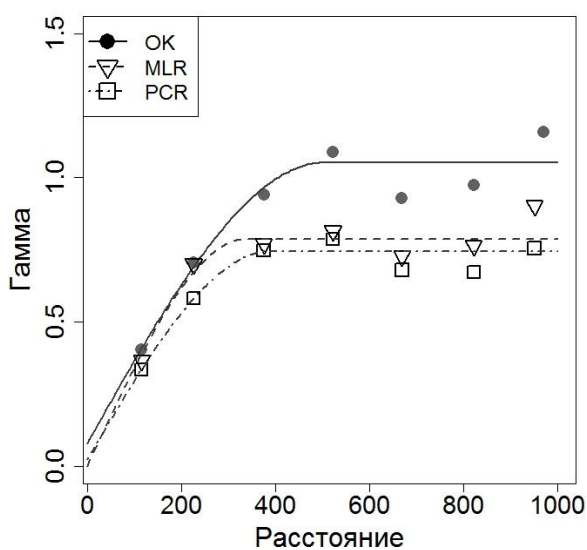
а) Гумус, %



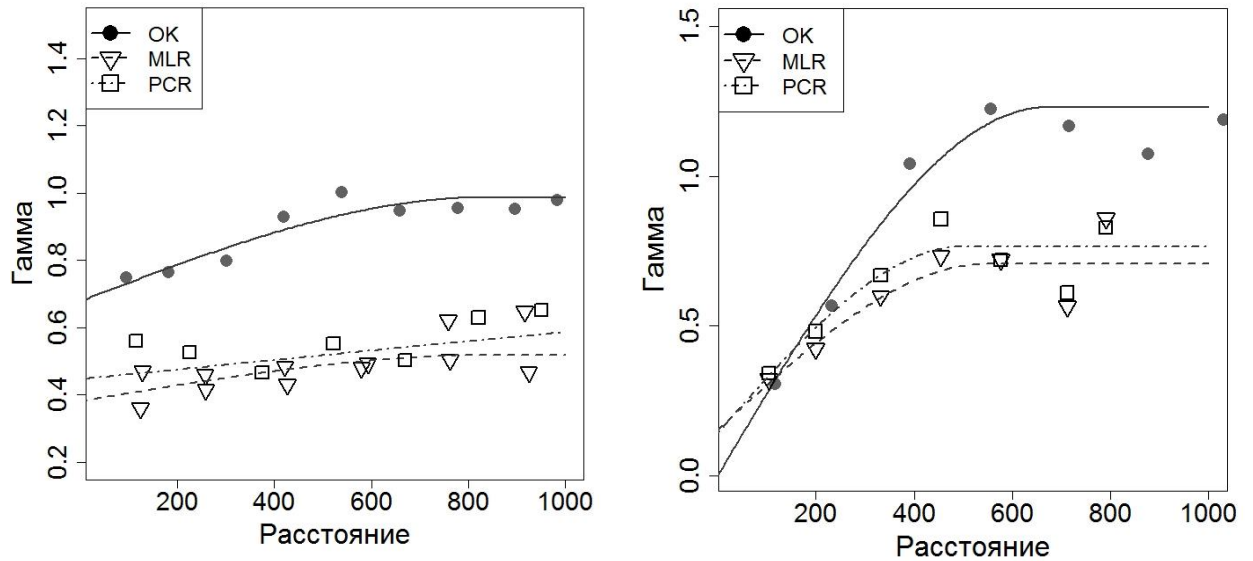
б) Азот гидролизующий, мг/кг



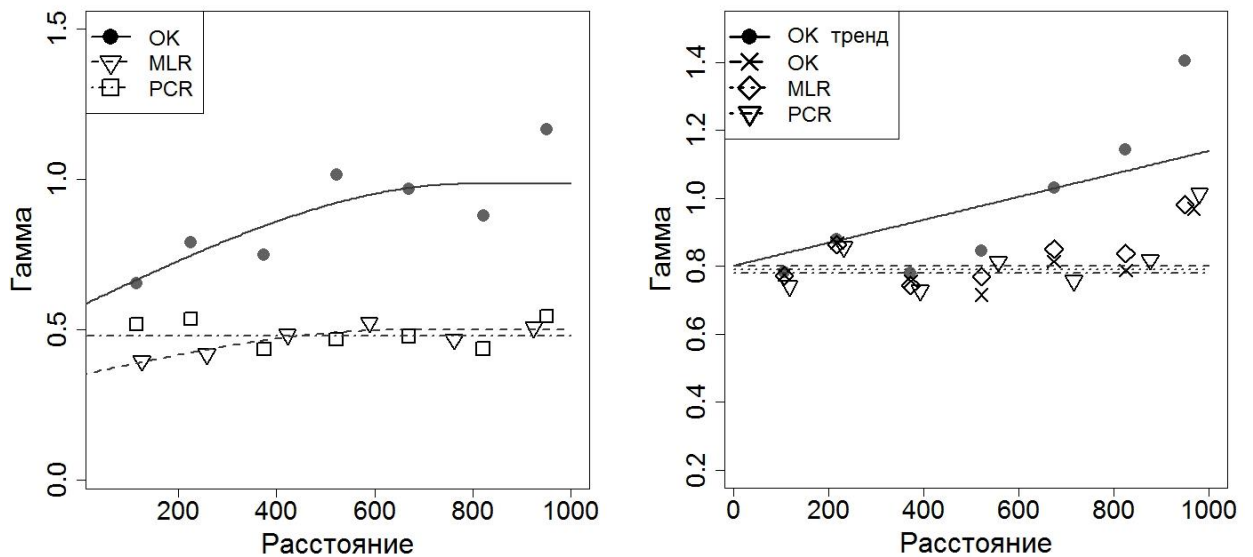
в) Фосфор подвижный, мг/кг



г) Калий подвижный, мг/кг



д) Кислотность



е) Физическая глина, %

Рисунок 17. Экспериментальные вариограммы остатков моделей MLR и PCR с подобранными моделями. Для наглядности представлены вариограммы ординарного кригинга (ОК).

Вариограммы остатков моделей регрессии для почвенных свойств Арского ГСУ также показывают изменение пространственной зависимости. Характеристики рельефа объяснили тренд в значениях гидролизуемого азота. Подвижный фосфор и кислотность показали снижение порога автокорреляции по сравнению с исходными данными (Рисунок 16, е, к). Вариограммы остатков регрессии гумуса определяют влияние на него характеристик рельефа, что отразилось на удалении существующего тренда.

В случае подвижного калия вариограммы остатков регрессионных моделей также показывают уменьшение порога и расстояния автокорреляции. В случае физической глины регрессионные модели также удаляют присутствующий тренд, но остатки моделей имеют «наггет-эффект» почти на том же уровне, что и подобранная теоретическая модель ОК. (рис. 17).

Таким образом, вариограммы остатков регрессии почвенных свойств двух ГСУ показывают снижение значений порога и уменьшение расстояния автокорреляции после применения регрессионного моделирования. Для каждого ГСУ отмечается различное изменение пространственной зависимости свойств почв, что подтверждает различное влияние рельефа на почвенные показатели.

После описания детерминированной и стохастической составляющей вариабельности почвенных свойств можно оценить долю дисперсию, которую они представляют в распределении конкретного почвенного показателя (рис. 18).

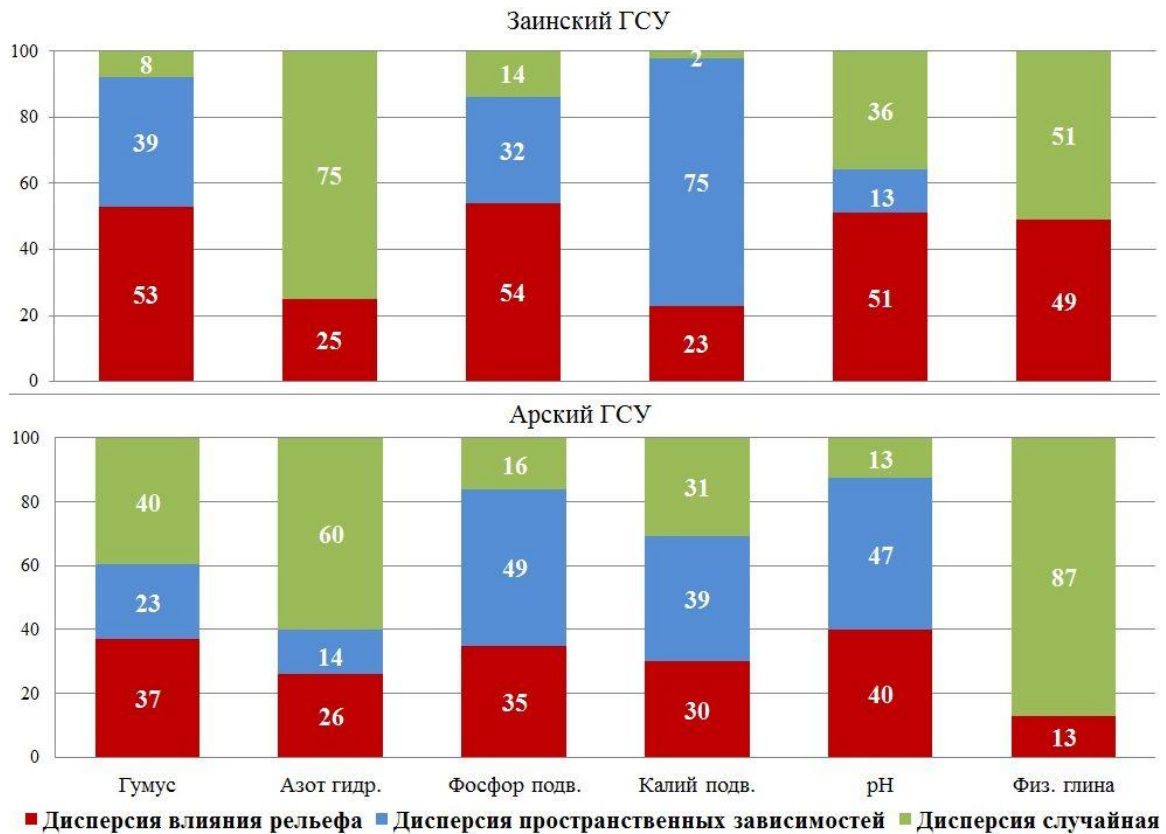


Рисунок 18. Соотношение долей (%) дисперсии вариабельности почвенных свойств

Детерминированная часть дисперсии почвенных свойств была получена из значений коэффициентов детерминации регрессионных моделей. Дисперсия пространственной зависимости свойств почв определялась по соотношению наггета к порогу вариограмм остатков моделей регрессии и вычленению доли остаточной дисперсии, которую они описывают.

Таким образом, в Заинском ГСУ детерминированная часть вариабельности почвенных свойств описывается регрессионными моделями на 23-54%, а в Арском ГСУ – на 13-40%. Вариограммами остатков регрессионных моделей в Заинском ГСУ описывается 39% остаточной дисперсии для гумуса, 32% для подвижного фосфора, 13 % для кислотности и 75% - для подвижного калия. Вариограммы остатков регрессии для гидролизуемого азота и физической глины имели чистый наггет-эффект, вариабельность этих показателей удалось описать лишь регрессионными моделями. В Арском ГСУ вариограммой остатков описывалось 23% дисперсии, которая осталась после регрессии гумуса. Вариограммами остатков моделей регрессии также описывалось 14% остаточной дисперсии для гидролизуемого азота, 49% для подвижного фосфора, 39% для подвижного калия и 47% - для кислотности. Вариограммы регрессионных остатков для физической глины показывали чистый наггет-эффект. Остальная часть дисперсии приходилась на случайный компонент.

4.2. Пространственный прогноз на основе характеристик рельефа и оценка точности прогноза

Итоговые модели регрессии свойств почв совместно с теоретическими моделями вариограмм, учитывающих остаточную пространственную зависимость, были использованы для получения интерполированных карт распределения почвенных показателей методом регрессионного кригинга. Неоднородность распределения почвенных свойств, а также геоморфологические особенности участков послужили причиной различий точности методов пространственной интерполяции. Результаты перекрестной проверки приведены в таблице 15. Наиболее точная модель имела

наибольшее сочетание критериев оценки, соответствующих требованиям (выделено жирным): ME $\rightarrow$ 0, RMSE $\rightarrow$ min, Rvar $\rightarrow$ max, RI $\rightarrow$ max, $R^2_{cv} \rightarrow$ max.

Таблица 15

Результаты оценки точности моделей

	Заинский ГСУ					Арский ГСУ				
	OK									
	ME	RMSE	RVar, %	R ² _{cv} %	RI	ME	RMSE	RVar, %	R ² _{cv} %	RI
Гумус										
OK	-0,02	0,48	63	68	0	-0,001	0,33	39	27	0
RK MLR	0,001	0,51	63	63	-6,25	0,001	0,34	31	26	-3,03
RK PCR	-0,005	0,51	62	63	-6,25	0,002	0,33	51	29	0
Азот гидролизуемый, мг/кг										
OK	-	-	-	-	-	0,016	16,88	21	14	0
RK MLR	0,098	22,36	30	20	-	0,079	16,19	27	22	4,09
RK PCR	-0,091	24,91	7	2	-	0,069	16,79	33	17	0,53
Фосфор подвижный, мг/кг										
OK	-0,73	60,09	58	36	-	-0,902	104,05	72	64	0
RK MLR	-0,09	55,90	64	44	6,97	-1,7	101,63	66	66	2,33
RK PCR	-0,206	57,89	64	40	3,66	-0,943	108,10	64	60	-3,89
Калий подвижный, мг/кг										
OK	0,08	22,22	34	22	0	-0,210	60,12	27	30	0
RK MLR	0,14	20,07	45	29	9,68	-0,452	55,90	48	39	7,02
RK PCR	0,171	19,86	40	31	10,62	-0,122	59,46	44	31	1,10
Кислотность										
OK	0,002	0,39	14	27	0	0,009	0,20	72	71	0
RK MLR	0,004	0,33	52	46	15,38	0,001	0,22	63	69	-10,00
RK PCR	0,002	0,39	45	24	0	0,002	0,21	66	70	-5,00
Физическая глина, %										
OK	0,007	4,10	26	40	0	-0,006	1,78	12	2	0
RK MLR	-0,017	4,09	51	40	-0,24	0,004	1,72	15	8	3,37
RK PCR	-0,024	4,02	49	42	1,95	0,002	1,80	18	6	-1,12

Примечание: Прочерк для значений гидролизующего азота в Заинском ГСУ обозначает отсутствие значений из-за чистого наггет-эффекта в моделях вариограмм.

R^2_{cv} – коэффициент детерминации моделей интерполяции после перекрестной проверки.

Для Заинского ГСУ метод ОК имел более высокую точность по сравнению с другими методами в случае интерполяции содержания гумуса. Скорее всего, это связано с сильной пространственной зависимостью этого

почвенного показателя. Метод RK MLR показал лучшую точность интерполяции гидролизуемого азота, подвижного фосфора и pH водной вытяжки. Карты, полученные методом RK MLR, имеют большее значение сохраненной дисперсии (R_{var}) и меньшую среднеквадратичную ошибку (RMSE). Метод RK PCR имел лучшую точность при интерполяции подвижного калия и физической глины. Включение характеристик рельефа в модели PCR этих почвенных показателей позволило уменьшить среднеквадратичную ошибку интерполяции. Преимущество регрессионной модели на главных компонентах (PCR) над множественной линейной регрессией (MLR) заключается в том, что главные компоненты являются линейной комбинацией всех характеристик рельефа, в то время как при построении модели множественной линейной регрессии важные переменные могут быть исключены из-за высокой корреляции с другими предикторами. В то же время при работе с моделями PCR осложняется интерпретация результатов моделирования.

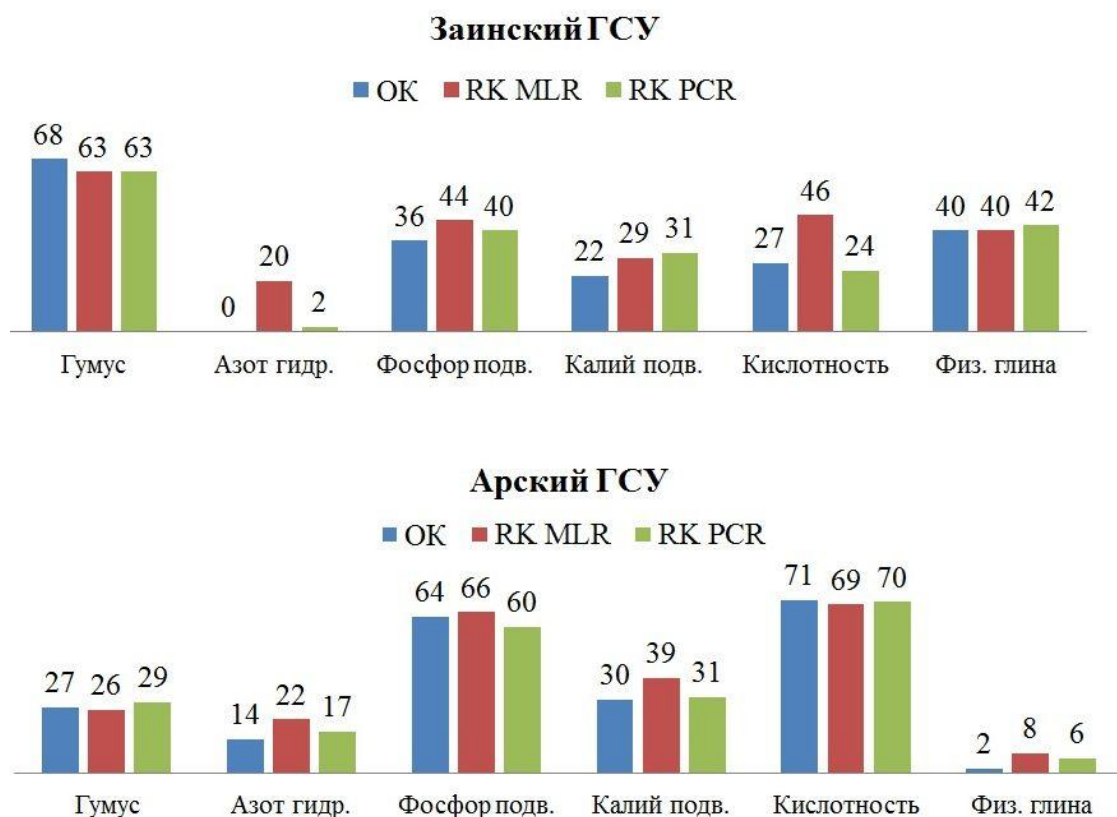


Рисунок 19. Коэффициенты детерминации (R^2_{cv}) моделей интерполяции после перекрестной проверки

Коэффициент детерминации, полученный после перекрестной проверки (R^2_{cv}) можно рассматривать как показатель соответствия прогнозных значений интерполяционных моделей наблюдаемым значениям. По сути он также оценивает долю объясненной моделью дисперсии. В Заинском ГСУ для наилучших моделей значения показателя R^2_{cv} распределены в порядке убывания следующим образом: содержание гумуса - ($R^2_{cv} (OK) = 68 \%$), кислотность - ($R^2_{cv} (RK \text{ MLR}) = 46 \%$) и подвижный фосфор - ($R^2_{cv} (RK \text{ MLR}) = 44 \%$), подвижный калий - ($R^2_{cv} (RK \text{ MLR}) = 29 \%$), гидролизующий азот ($R^2_{cv} (RK \text{ MLR}) = 20 \%$) (рис. 19).

Рельеф Арского ГСУ более однороден, по сравнению с Заинским ГСУ, и пространственная вариабельность почвенных свойств имеет меньшую зависимость от морфометрических характеристик рельефа. Тем не менее, в Арском ГСУ наилучшим методом интерполяции содержания гумуса является метод регрессионного кригинга с регрессией на главные компоненты, поскольку у этого метода высокое значение показателя RVar (51%) при схожих низких значениях показателей ME и RMSE остальных моделей. При интерполировании значений кислотности метод ординарного кригинга за счет сильной пространственной зависимости исходных данных показал более низкое значение показателя RMSE среди трех моделей. В свою очередь, метод регрессионного кригинга с множественной линейной регрессией показал высокую точность пространственной интерполяции для гидролизующего азота, подвижного фосфора, подвижного калия и физической глины. Во всех случаях метод RK MLR имел более низкую среднеквадратичную ошибку. Тем не менее, все три метода пространственной интерполяции значений физической глины имеют одинаково неудовлетворительный результат. По низким значениям показателя RVar можно судить о сильном сглаживании интерполированных значений относительно исходных данных. Таким образом, морфометрических характеристик рельефа недостаточно для объяснения вариации значений физической глины в Арском ГСУ. Хотя использование

регрессии на основе морфометрических характеристик рельефа и позволило удалить небольшой тренд в значениях физической глины, но остатки регрессионной модели показывали «наггет–эффект» на высоких значениях полудисперсии. Стоит отметить, что вариабельность значений физической глины является слабой, коэффициент вариации составляет $V=4\%$. Однако, если рассматривать составляющие физическую глину фракции ГМС, то выясняется, что в илистой фракции наблюдается средняя вариабельность ($V=15\%$), а фракция средней и мелкой пыли имеют сильную вариабельность значений, $V=23\%$ и $V=31\%$, соответственно. В конечном счете, при получении суммарных значений физической глины происходит выполаживание значений, что определяет низкое значение коэффициента вариации.

Наилучшие модели пространственной интерполяции почвенных свойств Арского ГСУ имеют следующие значения коэффициента детерминации после перекрестной проверки (в порядке убывания): для кислотности - ($R^2_{cv}(OK) = 71\%$), подвижного фосфора - ($R^2_{cv}(RK\ MLR) = 66\%$), подвижного калия - ($R^2_{cv}(RK\ MLR) = 39\%$), гумуса - ($R^2_{cv}(RK\ PCR) = 29\%$), гидролизуемого азота - ($R^2_{cv}(RK\ MLR) = 22\%$), физической глины - ($R^2_{cv}(RK\ MLR) = 8\%$).

Делать вывод лишь на основе значений коэффициента детерминации стоит с оговоркой. В таблице 16 представлены значения доверительного интервала показателя R^2_{cv} для признанных наилучшими моделей интерполяции почвенных показателей двух ГСУ. Доверительный интервал рассчитывался на основе коэффициента корреляции через z-преобразование, предложенное Р. А. Фишером (Дмитриев, 1995). Из таблицы 16 видно, что все значения R^2_{cv} моделей не выходят за пределы доверительного интервала, что говорит о значимом при уровне значимости $\alpha=0,05$ отсутствии различий моделей по значению коэффициента детерминации.

Таблица 16

Значения доверительного интервала коэффициента детерминации R^2_{cv}
наилучших моделей интерполяции

	Показатель	R^2	R^2 от	R^2 до
Заинский ГСУ (n=60)	Гумус, %	0,68	0,52	0,80
	Азот гидролизуемый, мг/кг	0,20	0,05	0,40
	Фосфор подвижный, мг/кг	0,44	0,24	0,62
	Калий подвижный, мг/кг	0,31	0,12	0,51
	Кислотность	0,46	0,26	0,63
	Физическая глина, %	0,42	0,22	0,60
Арский ГСУ (n=52)	Гумус, %	0,29	0,10	0,50
	Азот гидролизуемый, мг/кг	0,22	0,05	0,43
	Фосфор подвижный, мг/кг	0,66	0,48	0,79
	Калий подвижный, мг/кг	0,39	0,18	0,58
	Кислотность	0,71	0,55	0,82
	Физическая глина, %	0,08	0,00	0,26

Таким образом, в Арском ГСУ диапазон значений R^2_{cv} моделей интерполяции почвенных свойств шире, чем в Заинском ГСУ, в котором наилучшие модели имеют 20-68% соответствия прогнозных значений наблюдаемым значениям. Широкий разброс значений R^2_{cv} для моделей Арского ГСУ объясняется тем, что слабая зависимость почвенных свойств от морфометрических характеристик рельефа, помимо естественных орографических условий, может быть также обусловлена сельскохозяйственным использованием, в ходе которого свойства почв перераспределяются по участку. Для получения более точных карт распределения почвенных свойств необходимо либо привлечение дополнительных предикторов, характеризующих антропогенное влияние на участок, что не всегда возможно, либо уменьшение размеров элементарных участков при отборе объединенных проб, что в свою очередь увеличивает количество образцов и, соответственно, стоимость обследования.

Модели, которые были признаны наилучшими также были проверены с помощью показателя RI, который соотносил значения RMSE ординарного кригинга, взятого в качестве базового интерполятора, с значением RMSE

проверяемой модели интерполяции (рис. 20). Такое соотношение позволило количественно оценить изменение точности моделей регрессионного кригинга по сравнению с ординарным кригингом, за исключением случая, когда интерполяция ординарным кригингом не проводилась (гидролизуемый азот Заинского ГСУ).

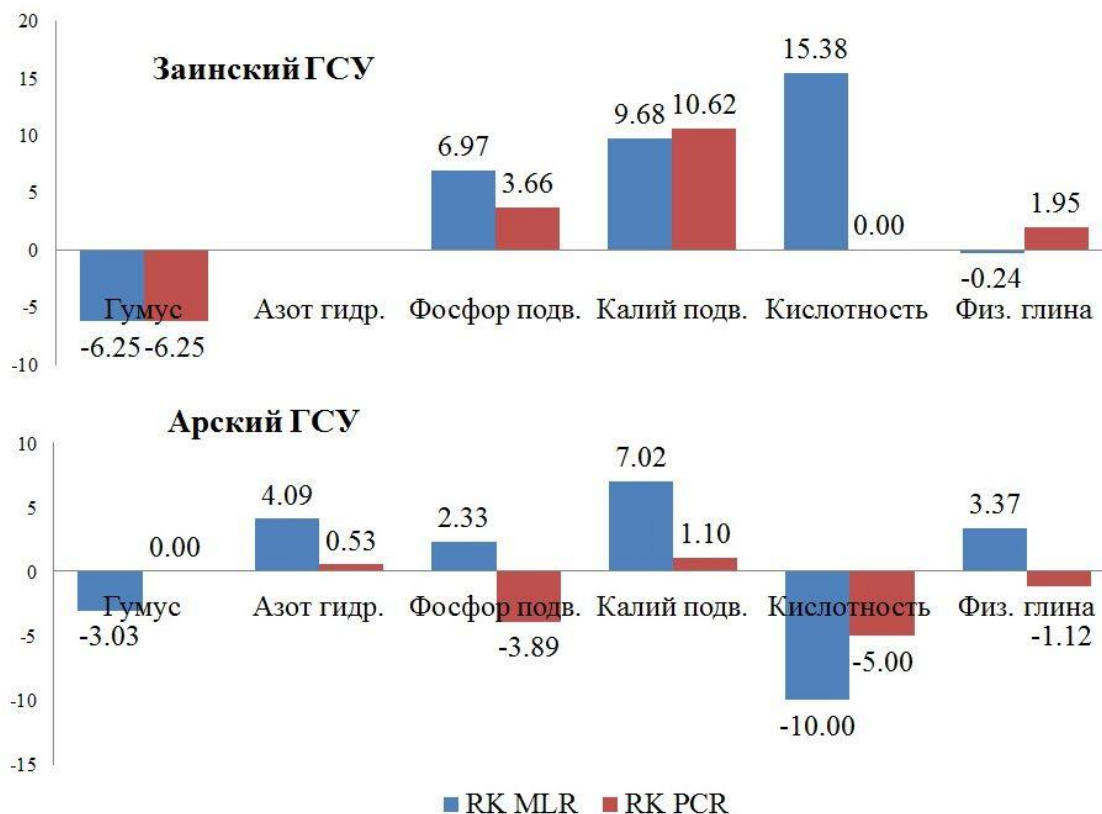
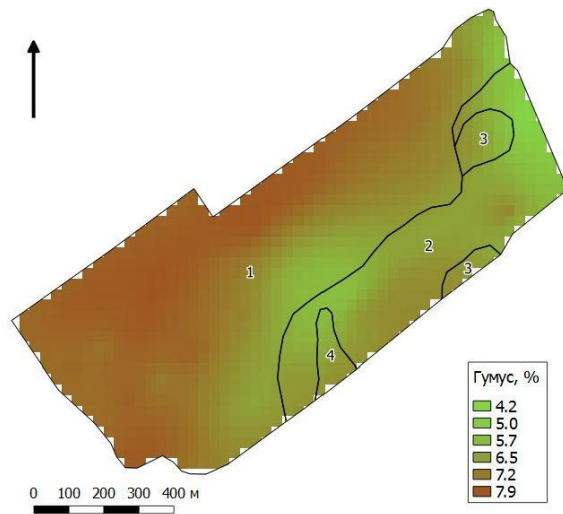


Рисунок 20. Изменение точности регрессионного кригинга по сравнению с ординарным кригингом (%)

Из рисунка 20 видно, что модели, признанные наилучшими, являются более точными в сравнении с ординарным кригингом. Регрессионный кригинг в Заинском ГСУ на 2-15%, а в Арском ГСУ на 2-7% улучшает пространственный прогноз свойств почв по сравнению с ординарным кригингом.

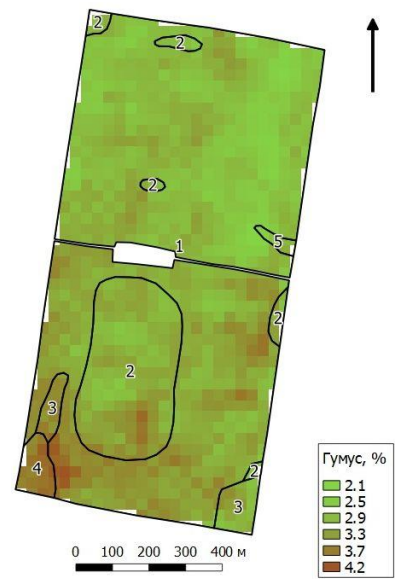
Принимая во внимание результаты перекрестной проверки из таблицы 15, а также результаты соотношения показателей RMSE (рис. 20), итоговые интерполяционные карты почвенных свойств двух ГСУ представлены на рисунке 21. На рисунке для наглядности на интерполированные карты наложены почвенные контуры из карты 1987 года.

Заинский ГСУ

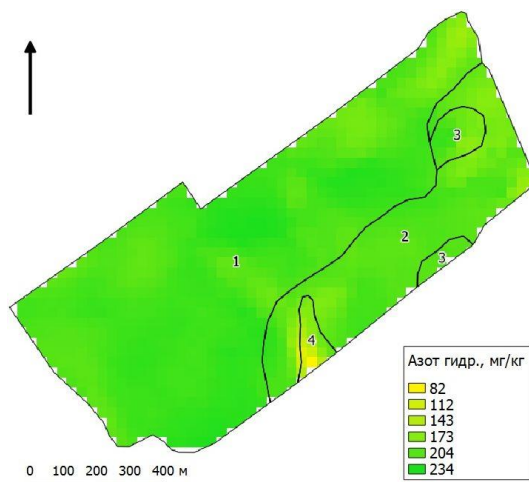


а) Гумус, % (OK)

Арский ГСУ



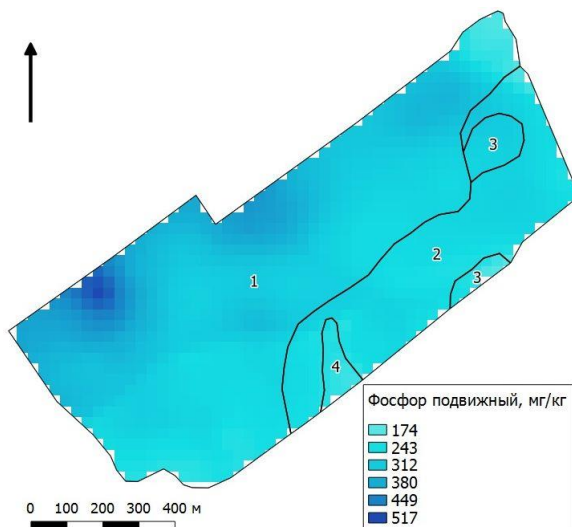
б) Гумус, % (RK+PCR)



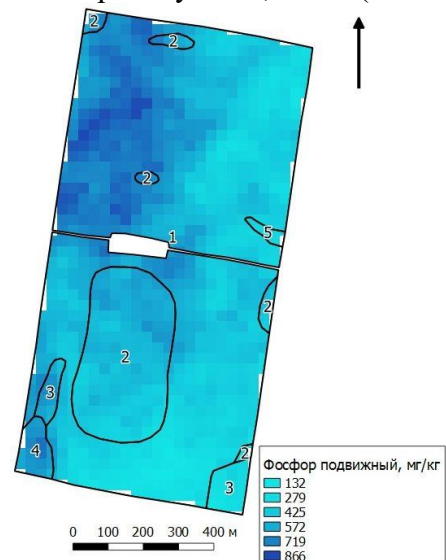
в) Азот гидролизуемый, мг/кг (RK+MLR)



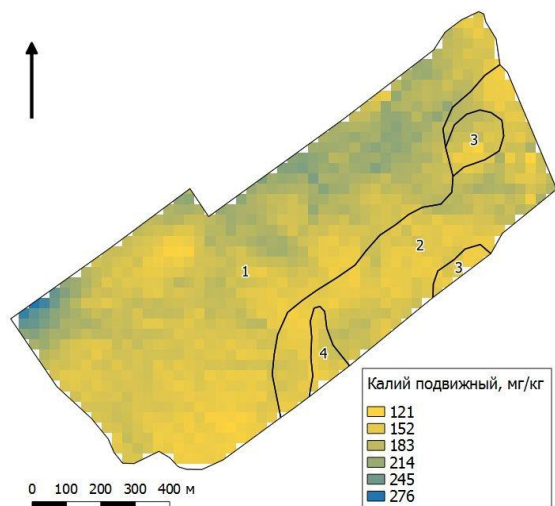
г) Азот гидролизуемый, мг/кг (RK+MLR)



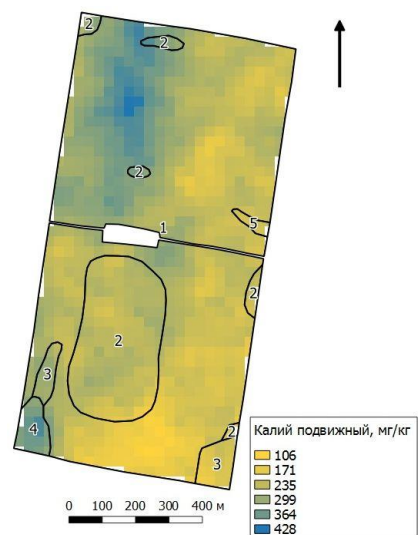
д) Подвижный фосфор, мг/кг (RK+MLR)



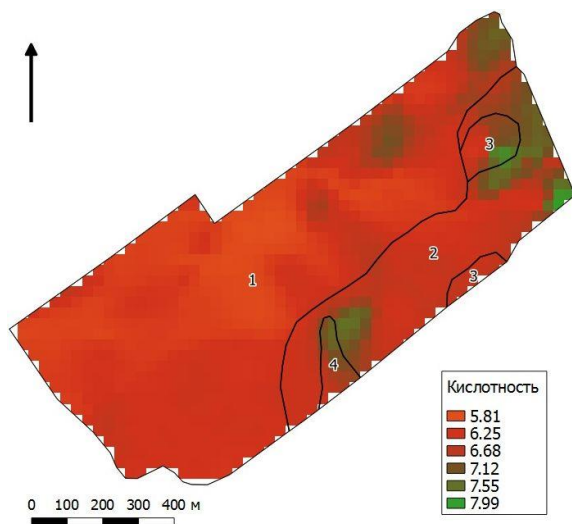
е) Подвижный фосфор, мг/кг (RK+MLR)



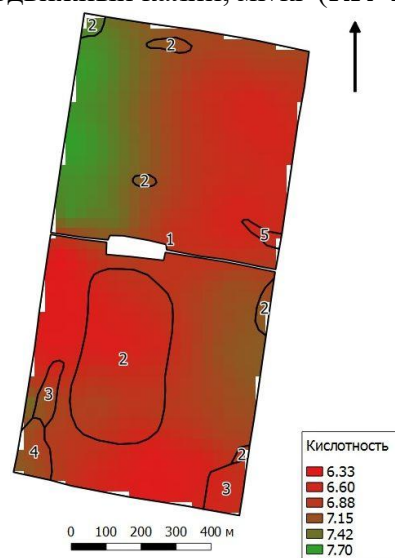
ж) Подвижный калий, мг/кг (RK+PCR)



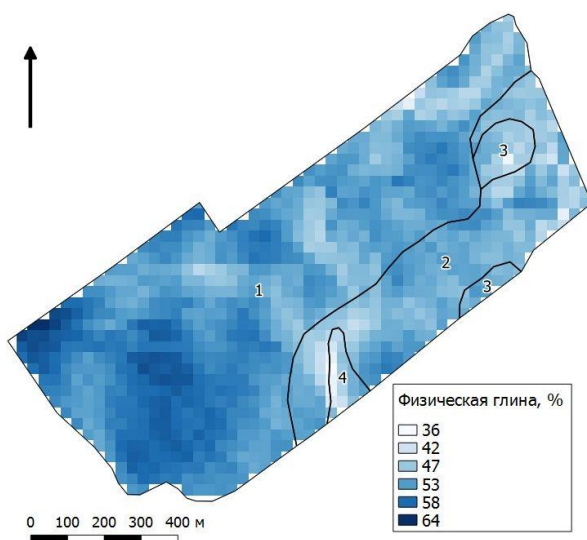
з) Подвижный калий, мг/кг (RK+MLR)



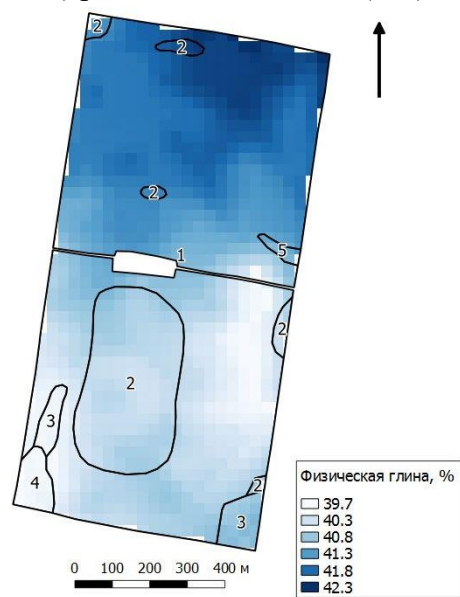
и) pH водной вытяжки (RK+MLR)



к) pH водной вытяжки (OK)



л) Физическая глина, % (RK+PCR)



м) Физическая глина, % (RK+MLR)

Рисунок 21. Итоговые карты вариабельности почвенных свойств. В скобках указан метод пространственной интерполяции.

Карты, полученные методом регрессионного кригинга, отличаются более высокой детализацией и отражают локальное влияние атрибутов рельефа, по сравнению с картами, полученными методом ординарного кригинга. В частности, в случае Заинского ГСУ на картах содержания физической глины и кислотности почв более четко прослеживаются последствия воздействия эрозионных процессов, выражающиеся в уменьшении содержания гумуса, «облегчении» гранулометрического состава и сопутствующего подщелачивания реакции среды, вследствие выхода на дневную поверхность нижележащих карбонатных горизонтов почв. В то же время, итоговые карты обладают более высоким «шумом» вследствие использования главных компонент, как основных предикторов. Тем не менее, эти карты также хорошо отражают влияние параметров рельефа на распределение почвенных свойств, и четко выделяют зоны действия эрозионных процессов.

ГЛАВА 5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ РАЗНОВРЕМЕННЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ

5.1 Сопоставление результатов агрохимических обследований

Последние наиболее полные почвенно-агрохимические обследования Заинского и Арского сортоиспытательных участков были проведены в 1987 году. Результаты описательной статистики для обследования двух ГСУ этого периода представлены в таблице 17.

Таблица 17

Описательная статистика по результатам
почвенно-агрохимического обследования 1987 года

	Мин.	Среднее	Ошибка среднего	Медиа- на	Макс.	Станд. отклон.	Коэфф. вариации	Значение теста Шапиро- Уилка
Заинский ГСУ								
Гумус, %	5,5	7,5	0,10	7,5	8,8	0,8	10	0,98*
Азот гидр., мг/кг	51	64	1,3	61	86	10,3	16	0,91
Фосфор подв, мг/кг	71	500	23,3	447	1292	180,4	36	0,87
Калий подв., мг/кг	75	197	11,1	198	490	85,6	43	0,91
Кислотность	4,9	5,3	0,06	5,1	7,0	0,47	9	0,61
Арский ГСУ								
Гумус, %	2,4	3,1	0,05	3,1	4,0	0,39	13	0,97*
Азот гидр., мг/кг	51	85	2,9	84	136	21,0	25	0,97*
Фосфор подв.,мг/кг	174	313	11,2	301	462	81,1	26	0,95
Калий под., мг/кг	161	218	6,2	207	366	45,0	37	0,95
Кислотность	5,1	5,4	0,04	5,4	6,7	0,26	5	0,77

* - предположение о нормальности выполняется при уровне значимости $\alpha=0,05$

Прямое сравнение результатов агрохимических обследований 1987 и 2011 года, за некоторым исключением, не представляется возможным, поскольку методы определения почвенных показателей двух этапов различаются. К примеру, содержание подвижного фосфора в 1987 году в Заинском ГСУ определялось с помощью метода Труога, а в 2011 - по методу Чирикова, как и содержание подвижного калия, которое в 1987 году было определено по методу Масловой. Подвижные фосфор и калий в Арском ГСУ

в 2011 году определялись по методу Кирсанова, тогда как в 1987 году подвижный калий был определен по методу Масловой, а подвижный фосфор – так же по методу Кирсанова. Гидролизуемые формы азота в Арском и Заинском ГСУ в 2011 году определялись по методу Корнфилда, тогда как в обследовании почв 1987 года – по методу Тюрина и Кононовой. Значения рН в двух ГСУ в 1987 году были определены из солевой вытяжки, тогда как в 2011 - из водной вытяжки.

В Заинском ГСУ содержание гидролизуемого азота в 1987 году определялось как повышенное, содержание подвижных форм калия также характеризуется как повышенное. В случае подвижного фосфора, то его содержание является очень высоким (Гинзбург, 1975; Аверкина, 2019). Почвы Заинского ГСУ на период 1987 года по содержанию гумуса (7,5 % в среднем) характеризуются как слабогумуссированные. Стоит отметить, что за 25 лет сельскохозяйственного использования содержание гумуса в этих почвах снизилось на 8% и на период 2011 года обследование содержание гумуса составляет в среднем 6,9% (Таблица 7). Вариабельность гумуса и кислотности была низкой, среднюю вариабельность имел гидролизуемый азот, а значениям подвижного фосфора и калия соответствовала очень высокая вариабельность.

В случае Арского ГСУ содержание гумуса по данным обследования 1987 года соответствует слабогумуссированной градации, подвижный фосфор соответствует очень высокому содержанию, а подвижный калий – высокому содержанию. Гидролизуемый азот, в свою очередь, имеет высокое содержание. Нименьшее значение коэффициента вариации соответствует значениям кислотности, что определяет ее вариабельность как низкую. Очень высокую вариабельность имеет лишь подвижный калий, высокая вариабельность соответствует значениям подвижного фосфора и гидролизуемого азота, а средней вариабельностью характеризуется содержание гумуса.

Таблица 18 показывает результаты теста Манна-Уитни для данных почвенно – агрохимического обследования 1987 года и 2011 года. В случае Заинского ГСУ статистически значимые различия при уровне значимости $\alpha=0,05$ между разновременными значениями были зафиксированы для содержания гумуса, подвижного фосфора и кислотности. В Арском ГСУ статистически отличаются друг от друга при уровне значимости $\alpha=0,05$ разновременные данные подвижного калия и кислотности.

Таблица 18

Сравнение разновременных значения почвенных показателей

	Заинский ГСУ		Арский ГСУ	
	Значение критерия	p-value	Значение критерия	p-value
Гумус, %	1562	0.000	800	0.117
Азот гидролизуемый, мг/кг	660	0.090	645	0.692
Фосфор подвижный, мг/кг	1619	0.000	503	0.091
Калий подвижный, мг/кг	951	0.794	225	0.000
Кислотность	645	0.047	195	0.000

Примечание: жирным выделены значения p-value которые меньше заданного уровня значимости ($\alpha=0,05$).

Сравнительная оценка коэффициентов вариации между разновременными обследованиями Заинского ГСУ показала, что по истечении 25 лет вариабельность гидролизуемого азота остается средней, низкой для кислотности и очень высокой для подвижного фосфора. Вариабельность содержания гумуса увеличивается с низкой градации в 1987 году до средней градации в 2011 году, а вариабельность подвижного калия уменьшается с очень высокой градации в 1987 году до средней градации в 2011 году. Различие коэффициентов вариации разновременных обследований статистически значима ($p<0.05$) при уровне значимости $\alpha=0,05$ для содержания гумуса, гидролизуемого азота и подвижного калия (табл. 19).

Таблица 19

Сравнение коэффициентов вариации между обследованиями ГСУ разных лет

Показатель	Период обследования	Гумус, %	Азот гидр., мг/кг	Фосфор подв., мг/кг	Калий подв., мг/кг	Кислотность	Физ, глина, %	n
Заинский ГСУ								
Коэфф. вариации, %	1987 год	10	16	36	43	9	-	60
	2011 год	13	12	32	14	7	11	
t значение	t _{крит} =1,96	2,00	2,19	0,91	7,02	1,92	-	
Арский ГСУ								
Коэфф. вариации, %	1987 год	13	25	26	37	5	-	52
	2011 год	13	16	35	29	6	4	
t значение	t _{крит} =1,96	0	0,30	0,21	0,17	0,13	-	

Примечание: жирным выделены значения t_{крит} которые меньше табличного t - значения, рассчитанного для заданного уровня значимости ($\alpha=0,05$).

В Арском ГСУ к 2011 году вариабельность гумуса остается средней, а для кислотности - низкой. Вариабельность гидролизуемого азота изменяется с высокой градации в 1987 году до средней градации в 2011 году. Вариабельность подвижного фосфора с 1987 года по 2011 год изменяется с высокой градации до очень высокой градации. Для подвижного калия вариабельность изменяется с очень высокой градации в 1987 году до высокой градации в 2011 году. Тем не менее, в Арском ГСУ не обнаружилось статистически значимых различий (при уровне значимости $\alpha=0,05$) между разновременными коэффициентами вариации почвенных свойств.

5.2 Сравнение пространственных структур и пространственная интерполяция почвенных свойств

После определения различий разновременных значений почвенных показателей, производилось сравнительная оценка пространственных структур показателей почвенного плодородия для двух лет обследования. Пространственная структура почвенных свойств для обследований разных лет оценивалась с помощью вариограммного анализа, результаты которого представлены в таблице 20.

Таблица 20

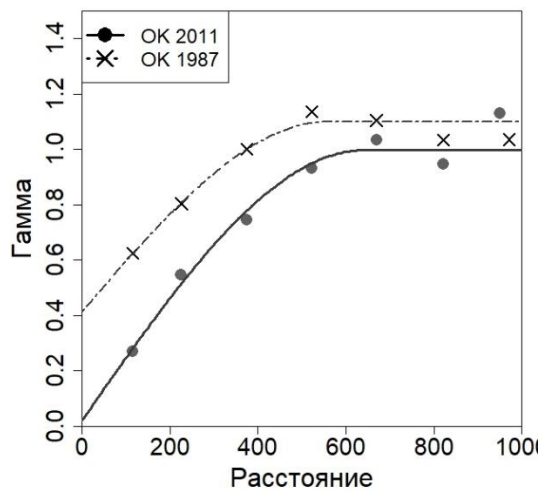
Параметры теоретических вариограмм в разные годы обследования.
(числитель-1987 год, знаменатель – 2011год)

Вариограммы для ОК							
	Модель	Радиус корреляции	Наггет (C ₀)	Част. порог (C ₁)	Порог (C=C ₀ +C ₁)	C ₀ /(C ₀ +C ₁), %	(C-C ₀)/C, %
Заинский ГСУ							
Гумус, %	<u>Sph</u>	<u>560</u>	<u>0,41</u>	<u>0,69</u>	<u>1,10</u>	<u>37</u>	<u>63</u>
	Sph	642	0,02	0,98	1,00	2	98
Азот гидр., мг/кг	<u>Sph</u>	<u>1074</u>	<u>0,35</u>	<u>1,16</u>	<u>1,51</u>	<u>23</u>	<u>77</u>
	Nug	-	0,95	-	-	-	-
Фосфор подв., мг/кг	<u>Sph</u>	<u>509</u>	<u>0,05</u>	<u>1,05</u>	<u>1,10</u>	<u>5</u>	<u>95</u>
	Sph	657	0,05	1,08	1,13	4	96
Калий подв., мг/кг	<u>Sph</u>	<u>544</u>	<u>0,02</u>	<u>1,17</u>	<u>1,19</u>	<u>2</u>	<u>98</u>
	Sph	503	0,08	0,97	1,05	8	92
Кислотность	<u>Lin*(Sph)</u>	<u>4762*(857)</u>	<u>0,75*(0,56)</u>	<u>1,02*(0,23)</u>	<u>1,77*(0,79)</u>	<u>42*(70)</u>	<u>58*(30)</u>
	Sph	841	0,68	0,31	0,99	67	33
Физическая глина, %	<u>=</u>	<u>=</u>	<u>=</u>	<u>=</u>	<u>=</u>	<u>=</u>	<u>=</u>
	<u>Sph</u>	791	0,58	0,41	0,99	58	42
Арский ГСУ							
Гумус, %	<u>Sph</u>	<u>203</u>	<u>0,78</u>	<u>0,24</u>	<u>1,02</u>	<u>76</u>	<u>24</u>
	Lin*(Sph)	1282*(1013)	0,36*(0,54)	1,44*(0,12)	1,80*(0,66)	20*(81)	80*(19)
Азот гидр., мг/кг	<u>Lin*(Sph)</u>	<u>1026*(379)</u>	<u>0,55*(0,58)</u>	<u>0,75*(0,09)</u>	<u>1,30*(0,67)</u>	<u>42*(87)</u>	<u>58*(13)</u>
		6548*(205)	0,72*(0,64)	1,94*(0,13)	2,66*(0,77)	27*(83)	73*(17)
Фосфор подв., мг/кг	<u>Sph</u>	<u>360</u>	<u>0</u>	<u>1,08</u>	<u>1,08</u>	<u>0</u>	<u>100</u>
	Sph	718	0,02	1,17	1,19	2	98
Калий подв., мг/кг	<u>Sph</u>	<u>241</u>	<u>0,36</u>	<u>0,62</u>	<u>0,98</u>	<u>37</u>	<u>63</u>
	Sph	480	0,53	0,43	0,96	55	45
Кислотность	<u>Sph</u>	<u>254</u>	<u>0</u>	<u>0,07</u>	<u>0,07</u>	<u>0</u>	<u>100</u>
		668	0	0,18	0,18	0	100
Физическая глина, %	<u>=</u>	<u>=</u>	<u>=</u>	<u>=</u>	<u>=</u>	<u>=</u>	<u>=</u>
	Lin*(Nug)	1078*(-)	0,80*(-)	0,36*(-)	0,18 (-)	0 (-)	0 (-)

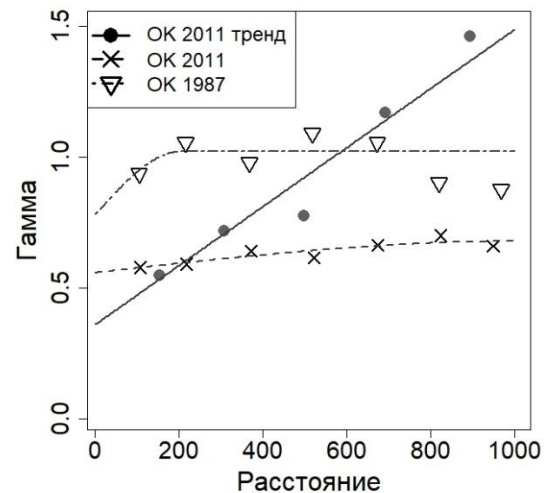
Sph – сферическая модель вариограммы, Nug – модель наггет-эффекта, Lin-линейная модель, *- тренд. В скобках указаны параметры вариограмм после удаления тренда по координатам

Для сопоставления исследований разных лет вариограммы значений почвенных показателей были построены с удалением тренда (если тренд в оригинальных данных присутствовал) и без учета анизотропии. Удаление тренда осуществлялось по координатам точек опробования, что также позволило корректно сопоставить данные агрохимического обследования двух лет. Наличие тренда для ряда показателей почв в ГСУ можно оценить по вариограммам на рисунке 20, где они сопоставлены между собой для разных лет.

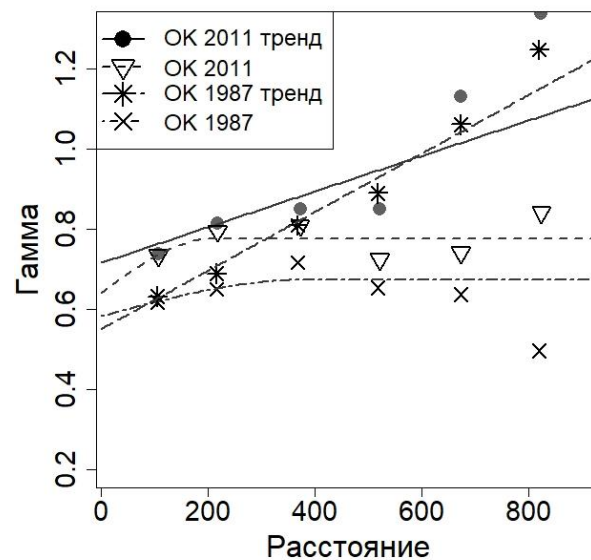
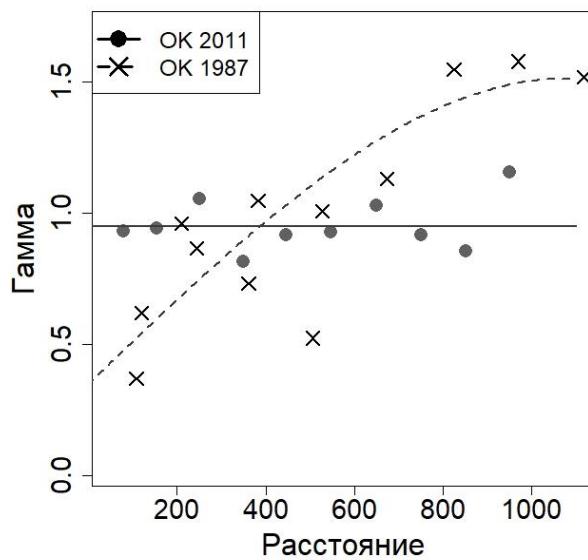
Заинский ГСУ



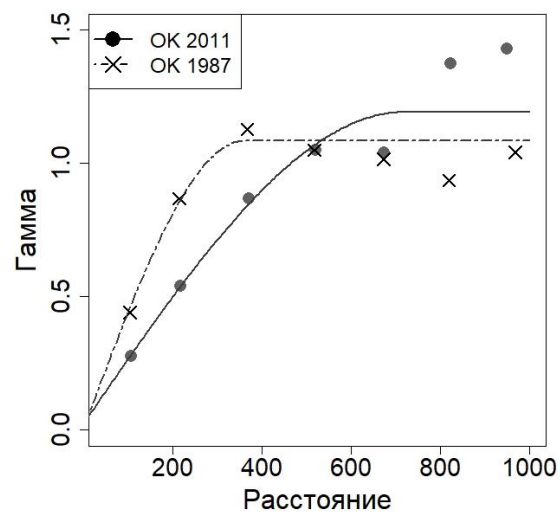
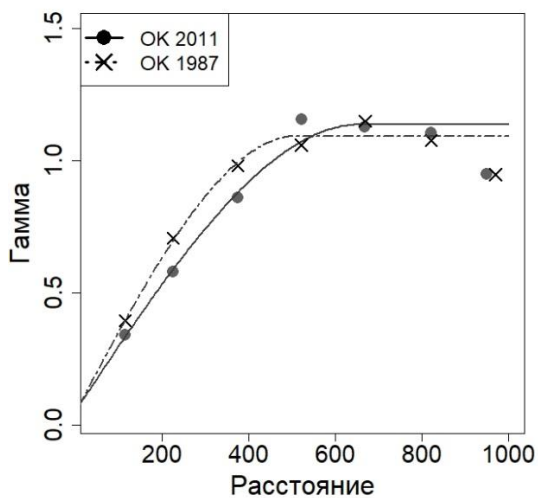
Арский ГСУ



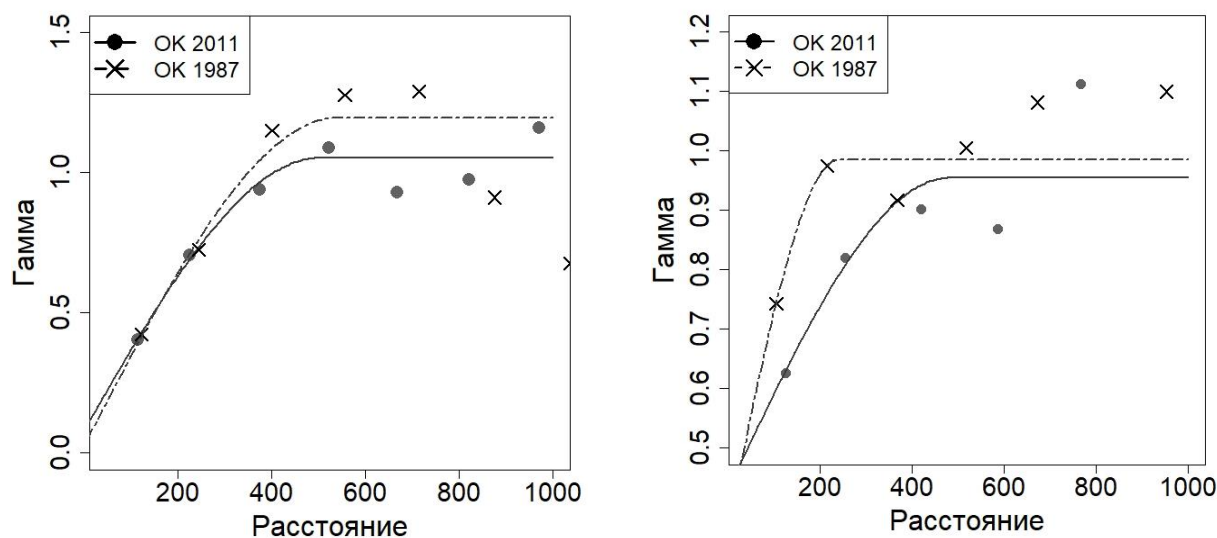
а) Гумус, %



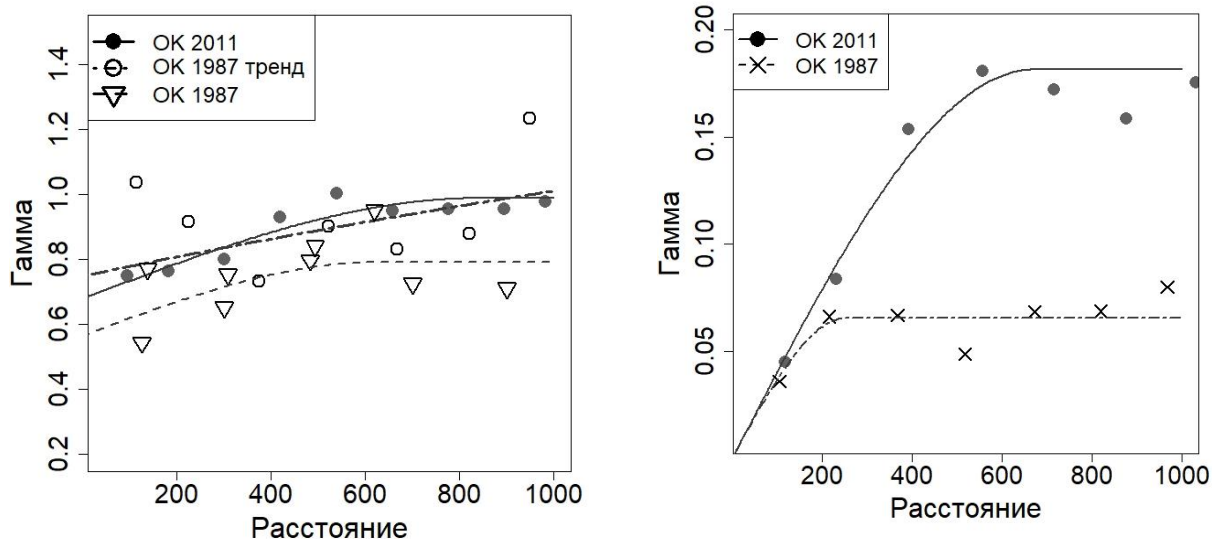
б) Азот легкогидролизующий, мг/кг



в) Фосфор подвижный, мг/кг



г) Калий подвижный, мг/кг



д) Кислотность

Рисунок 20. Вариограммы ОК стандартизованных значений для обследований ГСУ разных лет.

Сопоставление вариограмм разновременных стандартизованных данных показало, что за 25 лет сельскохозяйственной деятельности пространственная структура почвенных показателей Заинского ГСУ изменилась незначительно. Радиусы корреляции для почвенных свойств Заинского ГСУ имеют близкие значения и соответствуют диапазону 509 - 560 м в 1987 году (за исключением тренда для pH) и 503 – 841 м - в 2011 году. Лишь для гидролизующего азота (1987 год) радиус корреляции превышает 1000 м. В Арском ГСУ радиус корреляции почвенных показателей (без

тренда) имеет диапазон 203 - 360 м в 1987 году и 480 - 718 м – в 2011 году. Для содержания гумуса в 2011 году присутствует тренд, так же как и для разновременных значений гидролизуемого азота. Стоит отметить, что в Арском ГСУ, в отличие от Заинского ГСУ, радиусы корреляции для подвижного калия и фосфора к 2011 году возрастают почти в 2 раза, с 360 м до 718 м для подвижного фосфора и с 241 м до 480 м для подвижного калия. Для значений кислотности радиус корреляции с 1987 года по 2011 год возрастает в 2,6 раза (с 254 до 668 м). По очерку 1987 года участок нуждался в известковании, которое, вероятно, было проведено к 2011 году. Таким образом, анализ пространственных структур позволяет восстанавливать историю землепользования

По показателю обратному соотношению наггет к порогу в 1987 году содержание гумуса в Заинском ГСУ имело умеренную пространственную зависимость (63%), тогда как на период 2011 года пространственная зависимость оказалась сильной (98%). Содержание подвижных форм фосфора и калия в двух обследованиях имеют сильную пространственную зависимость (92-98%). Пространственная зависимость значений кислотности почв находится в пределах умеренной градации в 2011 году (33%), тогда как в 1987 году для данных кислотности существовал тренд, пространственная зависимость после удаления которого также была умеренной (30%). Для гидролизуемого азота удалось оценить зависимость лишь для 1987 года (сильная), поскольку в 2011 году распределение в пространстве этого показателя носит случайный характер и описывается «чистым» наггет эффектом.

В Арском ГСУ сильная пространственная зависимость для двух лет наблюдается лишь для подвижного фосфора (98-100%) и кислотности (100%). В остальных случаях пространственная зависимость умеренная (подвижный калий 1987 года (63%) и 2011 года (45%)), либо слабая (гумус 1987 года (24%)). Содержание гумуса 2011 года и гидролизуемого азота двух

лет имеет ярко выраженный тренд, что говорит о наличии факторов, оказывающих влияние на пространственное распределение этих показателей.

Таким образом, можно отметить, что наблюдаемое в последние годы уменьшение использования удобрений и применение мелиоративных мероприятий (Сычев, 2019), не привели к значительному изменению расстояний автокорреляции для большинства почвенных свойств, но в ряде случаев изменилась их пространственная зависимость. Изменения могут быть связаны с ограничением использования удобрений, что способствовало уменьшению доли искусственно создаваемой случайности в почвенных показателях при неравномерном внесении в почву элементов питания.

Для результатов агрохимического обследования двух лет также были построены регрессионные модели пространственного распределения почвенных свойств. В качестве предикторов также использовались данные, полученные из цифровой модели рельефа SRTM. Результаты агрохимического обследования 1987 года подвергались таким же процедурам построения моделей, как и в случае данных обследования 2011 года.

Модели множественной линейной регрессии для показателей почв Заинского ГСУ

$\text{Гумус} = 9.5 + 4.55 \text{ Mid-Slope Positon} - 0.004 \text{ Valley Depth} - 0.22 \text{ MRRTF} - 6.44 \text{ Convexity} + 5.09 \text{ Texture} + \varepsilon, (R^2_{\text{скор}} = 0,37),$

$\text{Азот гидр.} = 68.27 + 19.08 \text{ Mid-Slope Positon} - 2.29 \text{ MRVBF} - 41.84 \text{ Topographic Position Index} + \varepsilon, (R^2_{\text{скор}} = 0,45),$

$\text{Фосфор подв.} = 946.5 - 1.48 \text{ Valley depth} + 49.80 \text{ MRRTF} - 721.55 \text{ Convexity} + \varepsilon, (R^2_{\text{скор}} = 0,28),$

$\text{Калий подв.} = 442.83 - 58.12 \text{ Southwestness} + 35.65 \text{ MRRTF} - 679.30 \text{ Convexity} + \varepsilon, (R^2_{\text{скор}} = 0,41),$

$\text{pH} = 0.53 - 27.40 \text{ Plan Curvature} + 0.51 \text{ Southwestness} + 38.58 \text{ Slope} + 0.53 \text{ TWI} + 0.1 \text{ MRRTF} + 0.01 \text{ Convergence Index} + \varepsilon, (R^2_{\text{скор}} = 0,32),$

Модели множественной линейной регрессии для показателей почв Арского ГСУ

$$\text{Гумус} = 2.61 - 5.86 \cdot 10^{-6} \text{ Catchment area} + 0.12 \text{ MRVBF} + \varepsilon \quad (R^2_{\text{скор}} = 0,19),$$

$$\text{Азот гидро.} = 1283.41 - 7.51 \text{ Elevation} + 38.32 \text{ Relative Slope} - 31.31 \text{ Topographic Position Index} + \varepsilon, \quad (R^2_{\text{скор}} = 0,43),$$

$$\text{Фосфор подви.} = -7164.51 + 46.57 \text{ Elevation} - 27.19 \text{ VDCN} + \varepsilon, \quad (R^2_{\text{скор}} = 0,26),$$

$$\text{Калий подви.} = -1836.10 + 11.99 \text{ Elevation} + 17.43 \text{ MRVBF} + \varepsilon, \quad (R^2_{\text{скор}} = 0,20),$$

$$\text{pH} = 5.68 - 295.7 \text{ Profile Curvature} - 29.18 \text{ Plan Curvature} - 0.05 \text{ MRRTF} + \varepsilon, \quad (R^2 = 0,26)$$

Сопоставив значения коэффициентов детерминации моделей множественной линейной регрессии для разновременных данных двух ГСУ, можно отметить, что за 25 лет сельскохозяйственного использования зависимость показателей почвенного плодородия от рельефа в большинстве случаев усилилась. К примеру, в Арском ГСУ модель содержания фосфора описывала пространственное распределение этого показателя на 26 % в 1987 году, тогда как в 2011 – на 35%. В случае Заинского ГСУ модель содержания фосфора для данных 1987 года имела значение $R^2_{\text{скор}} = 0,28$, а для данных 2011 года значение коэффициента детерминации равнялось $R^2_{\text{скор}} = 0,54$. Аналогичная картина наблюдается для содержания гумуса и показателя кислотности в двух участках. Лишь для подвижного калия в Заинском ГСУ и гидролизуемого азота в двух участках зависимость от рельефа описывается хуже по сравнению с предыдущим почвенно-агрохимическим обследованием.

Принимая во внимания, что рельеф в исследуемых участках за прошедшие 25 лет мог измениться лишь незначительно, наблюдаемое повышение зависимости почвенных показателей от морфометрических характеристик рельефа может быть объяснено их более значительным перераспределением по элементам рельефа. Это в свою очередь, скорее всего, связано с ограниченным по сравнению концом 1980-х годов внесением в нынешнее время минеральных удобрений. К этому накладывается развитие

эрозионных процессов, которое также привело к дифференциации в пространстве показателей почвенного плодородия за 25 лет сельскохозяйственного использования (рис. 21).

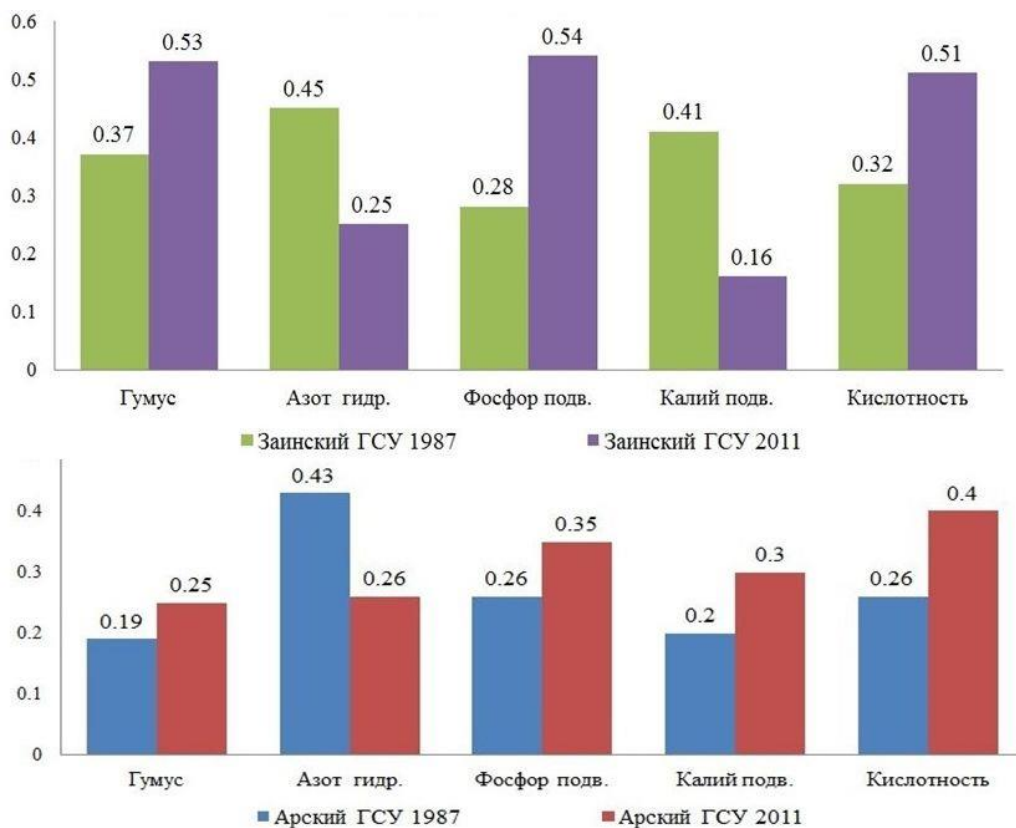


Рисунок 21. Коэффициенты детерминации моделей MLR для двух ГСУ в обследованиях разных лет

Полученные регрессионные модели, которые описывали детерминированную часть пространственной вариабельности почв, наряду с вариограммами остатков от регрессионного моделирования, которые в свою очередь учитывали стохастическую часть вариабельности, были использованы в регрессионном кригинге. В ходе геостатистического анализа наилучшими моделями для данных обследования 1987 года были выбраны модели, указанные в таблице 21. Оценка точности моделей производилась после перекрестной проверки как в случае ординарного кригинга, так и в случае регрессионного кригинга. Наилучшими моделями признавались модели на основе совокупного рассмотрения значений критериев точности. Кроме используемых ранее критериев оценки, были использованы такие оценки точности моделей как MSDR и RPIQ.

Таблица 21

Оценка точности методов интерполяции по данным 1987 года

Заинский ГСУ							Арский ГСУ						
Мо- дель	Гумус,%												Мо- дель
	ME	RMSE	MSDR	RPIQ	RVAR	R ² _{cv}	ME	RMSE	MSDR	RPIQ	RVAR	R ² _{cv}	
OK	0,009	0,66	1,08	1,55	0,33	0,26	0,006	0,4	0,99	1,47	0,02	0,04	OK
RK MLR	0,003	0,64	0,35	1,6	0,44	0,30	0,003	0,37	1,13	1,52	0,27	0,11	RK MLR
RK PCR	0,005	0,69	1,05	1,49	0,32	0,20	-0,003	0,38	1,14	1,58	0,2	0,08	RK PCR
Азот гидролизуемый,мг/кг													
OK	-0,002	8,07	1,11	1,96	0,41	0,37	-0,007	19,29	1,26	1,48	0,03	0,14	OK
RK MLR	-0,019	7,52	1,09	2,11	0,56	0,47	0,005	16,64	1,00	1,71	0,47	0,36	RK MLR
RK PCR	0,023	7,79	1,43	2,03	0,72	0,42	-0,199	17,78	1,02	1,6	0,42	0,27	RK PCR
Фосфор подвижный,мг/кг													
OK	-0,121	147,5	1,57	1,37	0,45	0,32	-0,586	64,84	1,36	1,58	0,58	0,34	OK
RK MLR	0,136	136,3	1,1	1,48	0,42	0,42	0,556	65,91	0,99	1,61	0,5	0,33	RK MLR
RK PCR	0,521	145,5	1,01	1,39	0,33	0,34	0,088	63,68	1,05	1,56	0,44	0,37	RK PCR
Калий подвижный,мг/кг													
OK	1,243	58,89	1,41	1,51	0,61	0,52	0,001	43,64	1,08	1,03	0,16	0,04	OK
RK MLR	0,721	59,65	1,01	1,49	0,52	0,51	0,35	42,28	1,11	1,07	0,24	0,10	RK MLR
RK PCR	0,966	57,23	0,93	1,55	0,53	0,55	0,066	41,79	1,03	1,06	0,2	0,12	RK PCR
Кислотность													
OK	0,001	0,44	0,88	0,45	0,07	0,09	-0,001	0,27	1,7	0,84	0,39	0,08	OK
RK MLR	0,005	0,42	0,94	0,48	0,37	0,19	0,002	0,23	1,22	0,98	0,31	0,19	RK MLR
RK PCR	0,005	0,42	1,09	0,48	0,32	0,18	0,001	0,25	1,44	0,9	0,37	0,04	RK PCR

Жирным шрифтом отмечены методы интерполяции, которые были признаны наилучшими согласно используемым критериям оценки. Как видно из таблицы 21 большинство почвенных свойств в Заинском ГСУ наилучшим способом интерполируется регрессионным кригингом с множественной линейной регрессией. Для почвенных показателей Арского ГСУ того же периода обследования наилучшим методом интерполяции также признан метод регрессионного кригинга, однако детерминированная часть подвижных форм фосфора и калия описывается главными компонентами,

полученными из морфометрических значений цифровой модели рельефа. Добавление к детерминированной части variability описания стохастического варьирования почвенных свойств позволило объяснить от 19 до 55% дисперсии (судя по значениям показателя R^2_{cv}) для почвенных свойств Заинского ГСУ. Наибольшее значение коэффициента детерминации приходится на значения подвижного калия, а самую низкую долю объясненной дисперсии имеет модель для значений кислотности.

В случае Арского ГСУ наибольшая доля объясненной дисперсии приходится на модель пространственной интерполяции подвижного фосфора (R^2_{cv} (RK PCR)=0,37), наименьшее количество дисперсии значений было описано для значений содержания гумуса, в этом случае с помощью регрессионного кригинга с множественной линейной регрессией удалось описать лишь 11% дисперсии. Как и в случае исследования пространственного распределения свойств для 2011 года, показатели почв обследования Арского ГСУ 1987 года имеют меньшую связь с рельефом, чем почвенные свойства Заинского ГСУ того же периода.

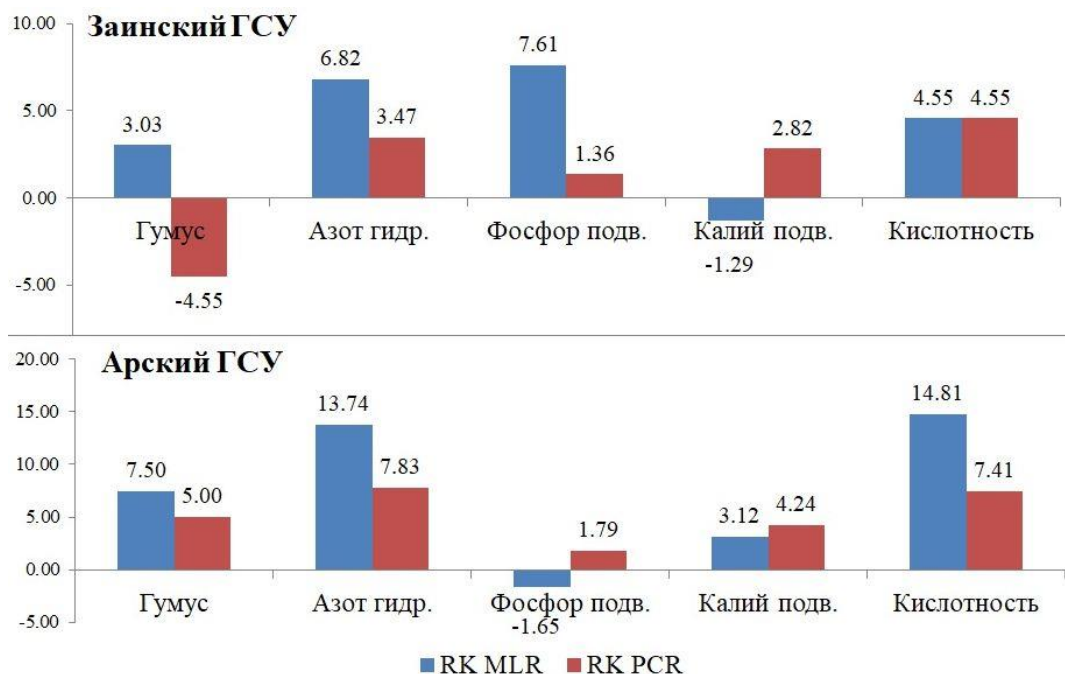


Рисунок 22. Изменение точности регрессионного кригинга по сравнению с ординарным кригингом (RI) для данных 1987 года.

Выбор наилучшей модели для почвенных свойств каждого ГСУ также подтверждается показателем RI (рис. 22). В Заинском ГСУ регрессионный кригинг превосходит ординарный кригинг по точности на 3,03-7,61%. В случае кислотности регрессионный кригинг с множественной линейной регрессией и регрессионный кригинг на главных компонентах показали одинаковое превышение над ординарным кригингом. Тем не менее, наилучшей моделью была признана модель RK MLR, поскольку она имела более высокое значение коэффициента детерминации ($R^2_{cv}(\text{RK MLR})=0,19$) и показателя отношения дисперсий ($RVAR_{\text{RK MLR}}=0,37$). В случае Арского ГСУ улучшение точности регрессионного кригинга по сравнению с ординарным кригингом составляет для наилучших моделей 3,12-14,81%. Наибольшее увеличение точности наблюдается для гидролизующего азота и кислотности.

Кроме вышеуказанных критериев оценки точности было осуществлено сопоставление между собой наблюдаемых значений и прогнозных значений, полученных из моделей интерполяции. Результаты сопоставления были выражены в виде коэффициента детерминации линейной регрессионной модели каждого почвенного показателя для двух лет обследования. Поскольку наблюдаемые значения были отобраны из полигонального элементарного участка, то прогнозные значения также были экстрагированы из тех же самых полигональных участков и усреднены (табл. 22).

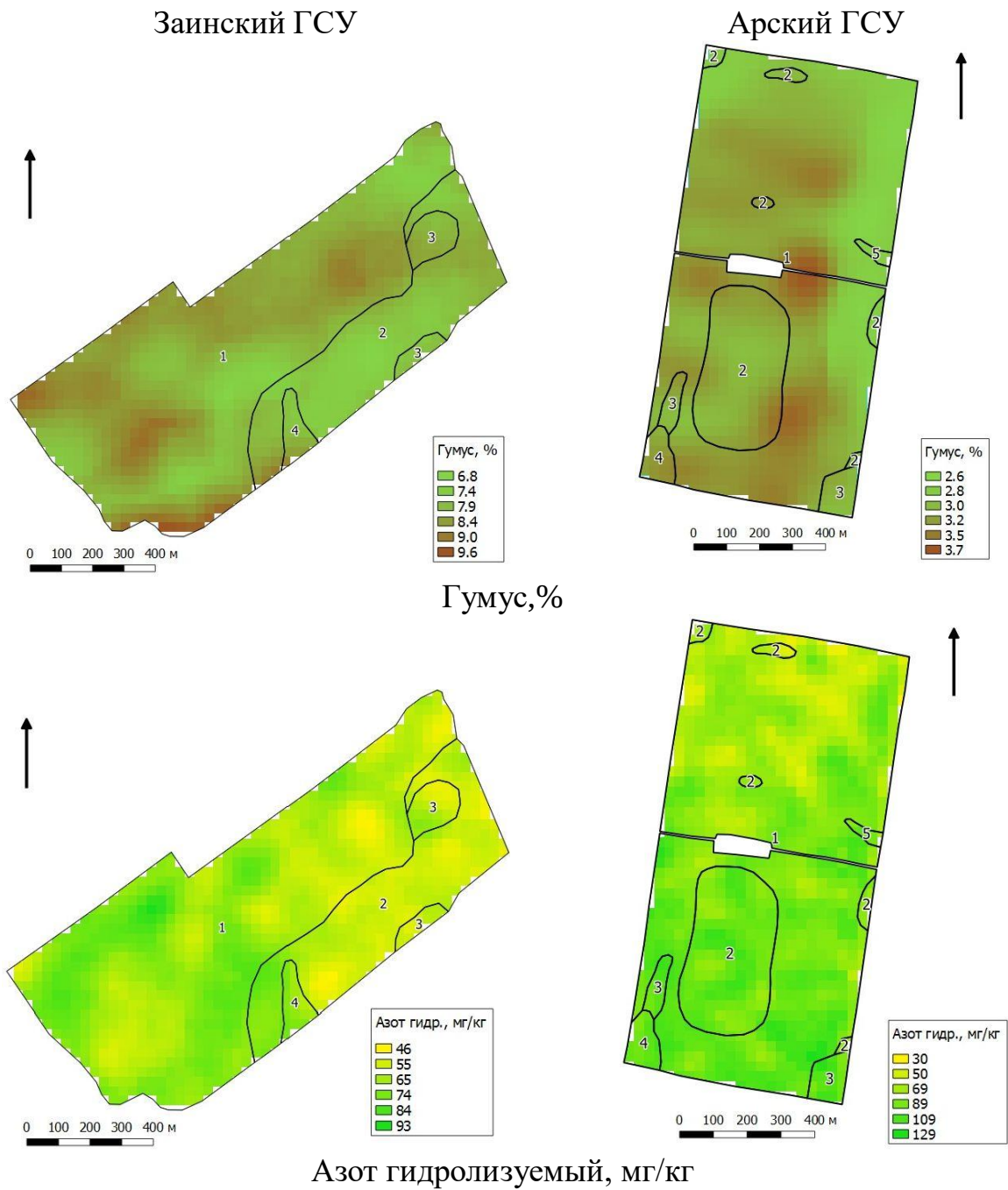
Таблица 22

Значения коэффициентов детерминации линейной регрессии для спрогнозированных и наблюдаемых значений

	Заинский ГСУ		Арский ГСУ	
	R^2 (1987)	R^2 (2011)	R^2 (1987)	R^2 (2011)
Гумус, %	0,37	0,93	0,21	0,64
Азот гидролизующий, мг/кг	0,77	0,28	0,48	0,26
Фосфор подвижный, мг/кг	0,85	0,78	0,66	0,81
Калий подвижный, мг/кг	0,84	0,75	0,37	0,73
Кислотность	0,37	0,54	0,90	0,92
Физическая глина, %		0,50		0,20

В большинстве случаев коэффициенты детерминации линейных регрессионных моделей имеют высокие значения ($R^2 > 0,60$). Для Арского ГСУ наихудшим образом было оценено содержание гумуса в 1987 году ($R^2 = 0,21$), а также азота гидролизуемого ($R^2 = 0,26$) и физической глины ($R^2 = 0,20$) в 2011 году. Причины неудовлетворительного описания пространственного распределения гумуса могут быть связаны с внесением органических удобрений на этой территории в 1986 году в количестве 12 т/га (Братчиков и др., 1986), вследствие чего не удалось выявить связь гумуса с рельефом. Однако, по данным обследования 2011 года коэффициент R^2 для гумуса равен 0,64, что говорит о достаточно высоком совпадении прогнозных значений с наблюдаемыми значениями. Поскольку в последние 20 лет внесение органических удобрений на полях ГСУ не применяется, то с помощью регрессионного кригинга удалось выявить связь содержания гумуса с рельефом. К 2011 году связь почвенных свойств с рельефом в Арском ГСУ усиливается, что также свидетельствует о перераспределении показателей почв по элементам рельефа. Судя по значениям коэффициента детерминации, перераспределение значений почвенных свойств по элементам рельефа также наблюдается и для Заинского участка. К примеру, по сравнению с 1987 годом в 2011 году для содержания гумуса и кислотности почв связь с рельефом увеличилась. Однако для содержания подвижных форм фосфора и калия лучший прогноз получился для данных 1987 года обследования ($R^2 = 0,84-0,85$), по сравнению с обследованием 2011 года ($R^2 = 0,75-0,78$). Отдельно стоит отметить удовлетворительный прогноз для содержания физической глины в Заинском ГСУ ($R^2 = 0,50$) по сравнению с неудовлетворительным результатом для содержания глины Арского ГСУ ($R^2 = 0,20$). Такой результат моделирования пространственного распределения физической глины в Арском ГСУ определяется, скорее всего, незначительной связью значений морфометрических характеристик рельефа и содержания физической глины.

Модели для почвенных данных обследования 1987 года, получившую наибольшую точность, в конечном виде были оформлены в виде карт пространственного распределения почвенных свойств, которые представлены на рисунке 23. На рисунке для наглядности на интерполированные карты наложены почвенные контуры из карты 1987 года.



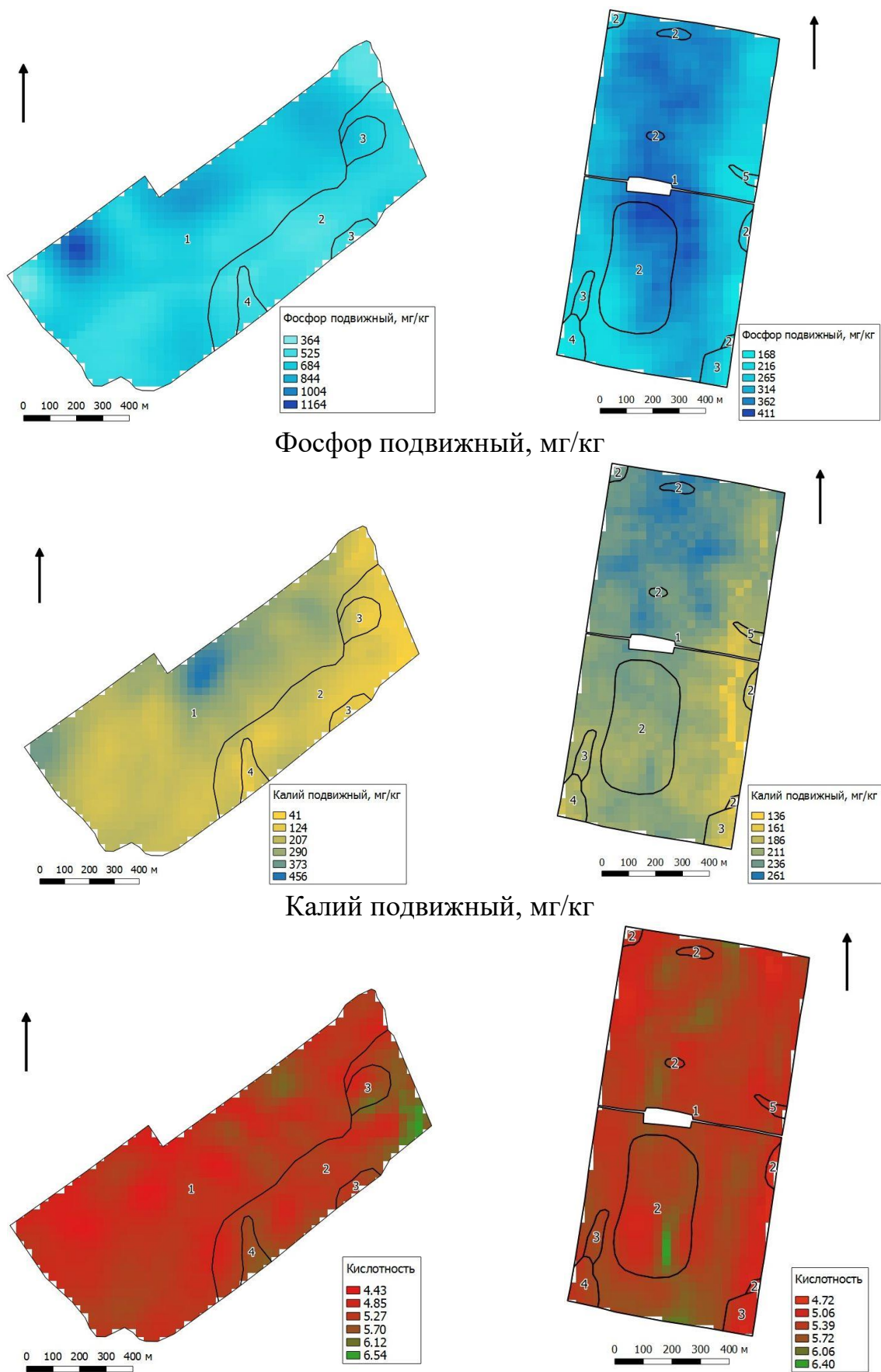


Рисунок.23. Итоговые карты распределения почвенных свойств для агрохимического обследования 1987 года

В случае Арского ГСУ, контуры слабосмытых почв практически не выделяются. В случае Заинского ГСУ, южная и юго-восточная часть которого подвержена эрозионным процессам, можно отметить, что интерполированные карты в большинстве случаев отражают контуры эрозионных разновидностей почв. Наиболее наглядно данная картина заметна в случае кислотности почв, значение которой повышается вследствие локального выхода на дневную поверхность карбонатов в наиболее эродированных участках (контур 4). Значения остальных показателей на эродированных участках снижаются (Рисунок 21).

5.3 Кластеризация интерполированных карт

Нечеткая кластеризация хорошо зарекомендовала себя для классификации почвенных наблюдений (Королева и др., 2006), а также в работах по цифровому картированию почв (McBratney et al., 1997; Zhu et al., 2010a). Преимуществом данного метода кластеризации является то, что он может учитывать нечеткую (континуальную) природу почвы и ландшафта (Lark, 1999).

Результаты интерполяции агрохимических обследований 2011 и 1987 года были подвержены кластерному анализу, основанному на нечеткой кластеризации (fuzzy clustering). По результатам этапа кластеризации были построены графики распределения индексов кластеризации, по которым наглядно можно судить о количестве классов, на которое разделяется пространство почвенных показателей (прил. Д).

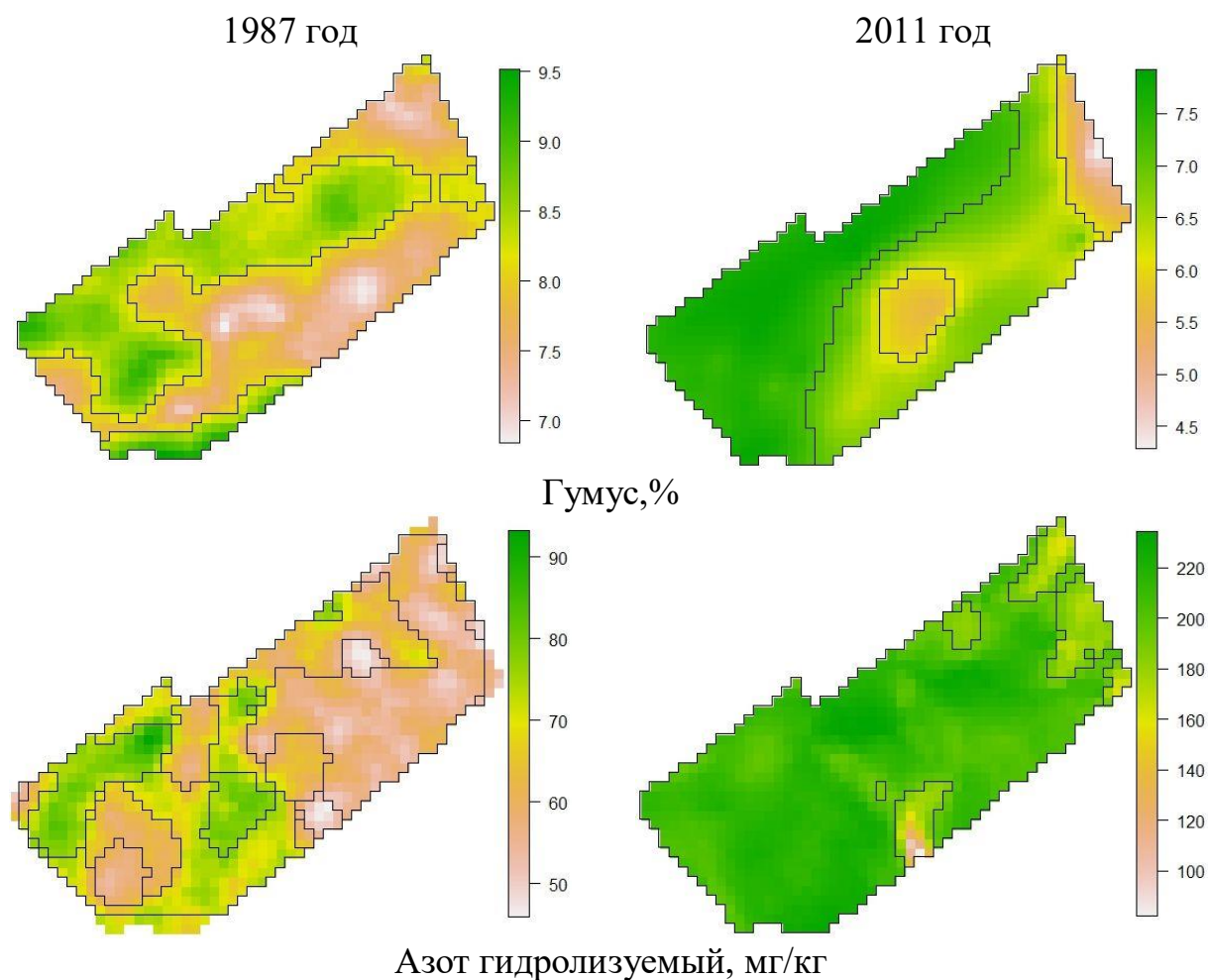
Таблица 23

Количество кластеров, полученное в ходе нечеткой кластеризации для данных разновременных обследований

Количество кластеров							
	Год	Гумус,	Азот гидр.	Фосфор подв.	Калий подв.	Кислотность	Физ. глина
Заинский ГСУ	1987	3	6	3	2	2	
	2011	3	2	2	5	2	2
Арский ГСУ	1987	2	2	2	2	2	
	2011	2	2	2	5	2	2

Как видно из таблицы 23. в большинстве случаев по агрохимическим показателям территории двух ГСУ могут быть поделены на 2 кластера. Лишь в случае гидролизуемого азота (1987), а также подвижного калия (2011) для Заинского ГСУ, а также подвижного калия (2011) для Арского ГСУ количество кластеров значительно превышало два кластера. В Заинском ГСУ по три кластера имели карты содержания гумуса в оба периода обследования, а также карта подвижного фосфора 1987 года. Таким образом можно сделать вывод, что почвы Заинского ГСУ более неоднородны по агрохимическим свойствам, чем почвы Арского ГСУ.

Наложение границ кластеров на интерполированные карты почвенных свойств позволило наглядно выявить отличающиеся друг от друга по значениям исследуемого показателя зоны в пределах сортоиспытательных участков (рис. 24, 25).



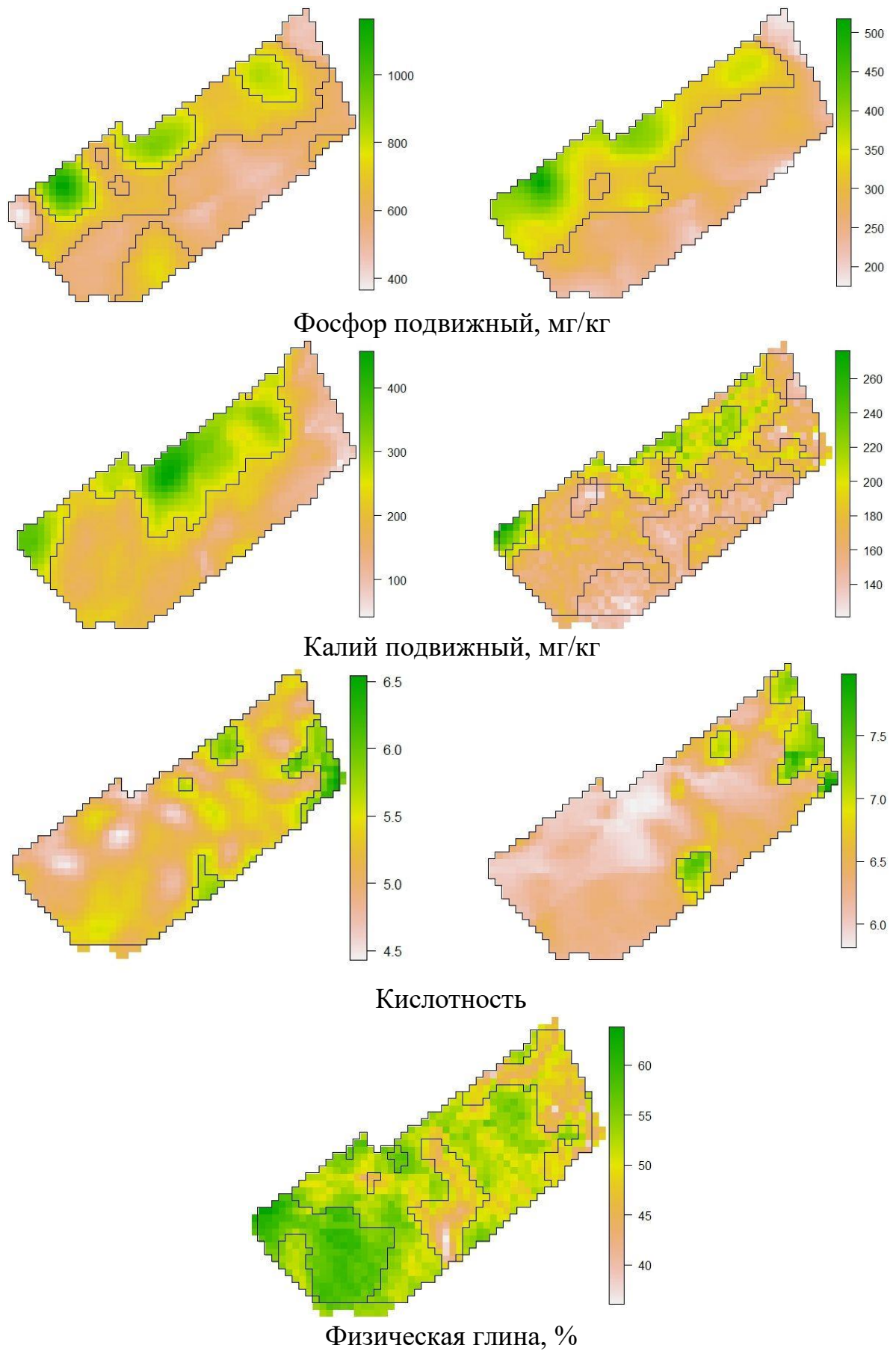
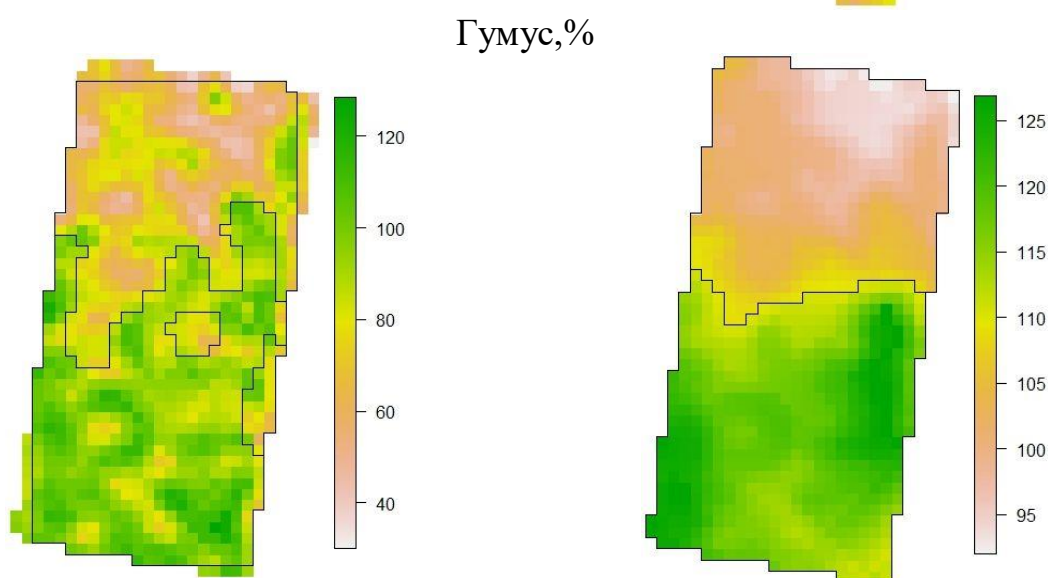
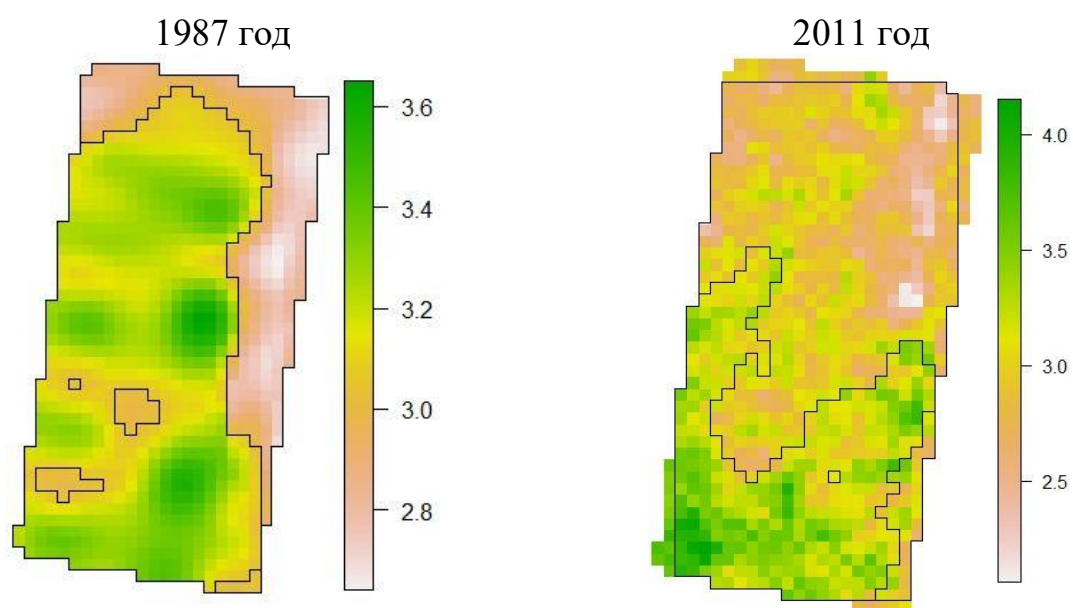


Рисунок 24. Сопоставление карт разных лет с выделенными кластерами для Заинского ГСУ.

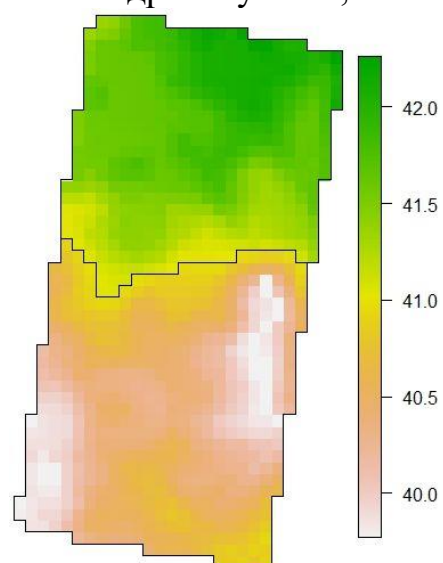
Как видно из рисунка 23, в большинстве случаев Заинского ГСУ кластеры выделяются по эродированным областям участка. Важно отметить, что с течением времени в ряде случаев эродированные зоны в большей мере обособляются по сравнению с картиной, наблюдаемой в прошлом агрохимическом обследовании. Наиболее отчетливо это отмечается для гидролизуемого азота в 2011 году, где можно наблюдать четкое выделение отдельного кластера, границы которого совпадают с контуром почв на почвенной карте, который в свою очередь был выделен на основе влияния эрозионных процессов на этом участке поля. Тем не менее, на момент создания почвенной карты и прошлого агрохимического обследования 1987 года распределение гидролизуемого азота на территории Заинского ГСУ не следовало почвенным выделам на карте, что в очередной раз показывает изменения в содержании элементов питания между разными годами обследования.

Для Арского ГСУ в ряде случаев кластеризация приводит к разделению участка на северную и южную части. Форма участка в виде вытянутого полигона, вероятно, способствовала разделению агротехнических мероприятий, выполняемых в ходе сортоиспытания, на две части. К примеру, северная и южная часть четко различается по содержанию гидролизуемого азота. К тому же, если судить по карте содержания физической глины, которая также делит ГСУ на две зоны, то в южной части находится более облегченные по ГМС почвы. Небольшие участки смытых и намытых почв, которые выделялись на почвенной карте 1987, не находят отражение в виде отдельных кластеров. Рельеф в виде слабопологого склона не приводит к развитию эрозионных процессах на этом участке.

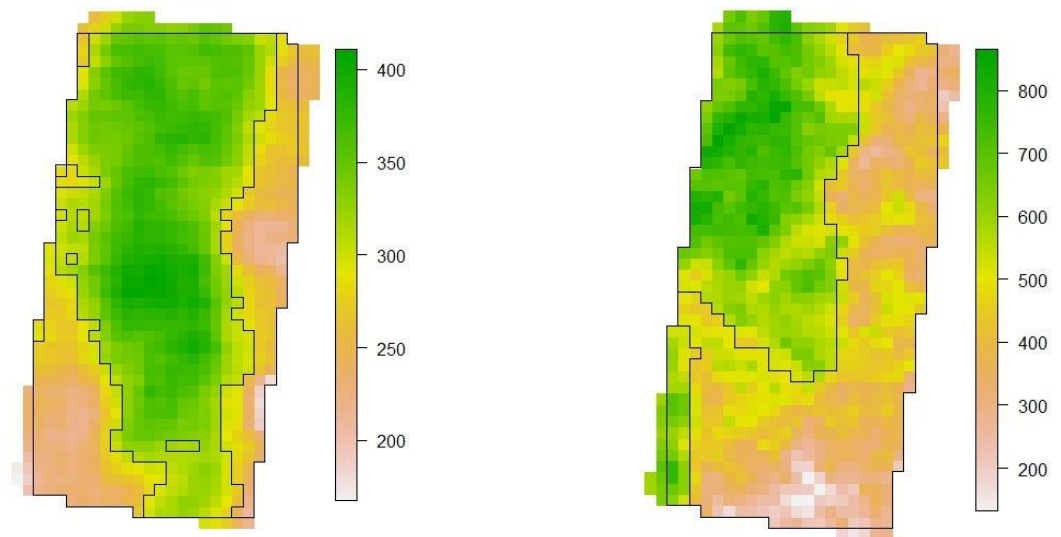
Поскольку для опытного дела важным является единообразие почвенного покрова, на котором производится сортоиспытательная деятельность, то была проверена согласованность кластеров почвенных свойств с почвенной картой 1987 года. По результатам классификации были получены оценки каппа-статистики и показатели общей точности.



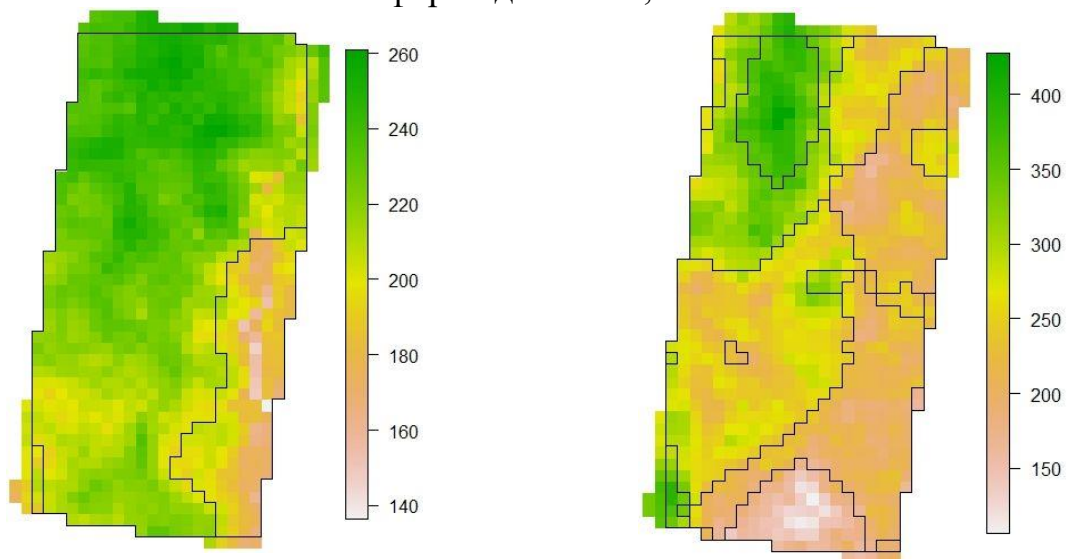
Азот гидролизуемый, мг/кг



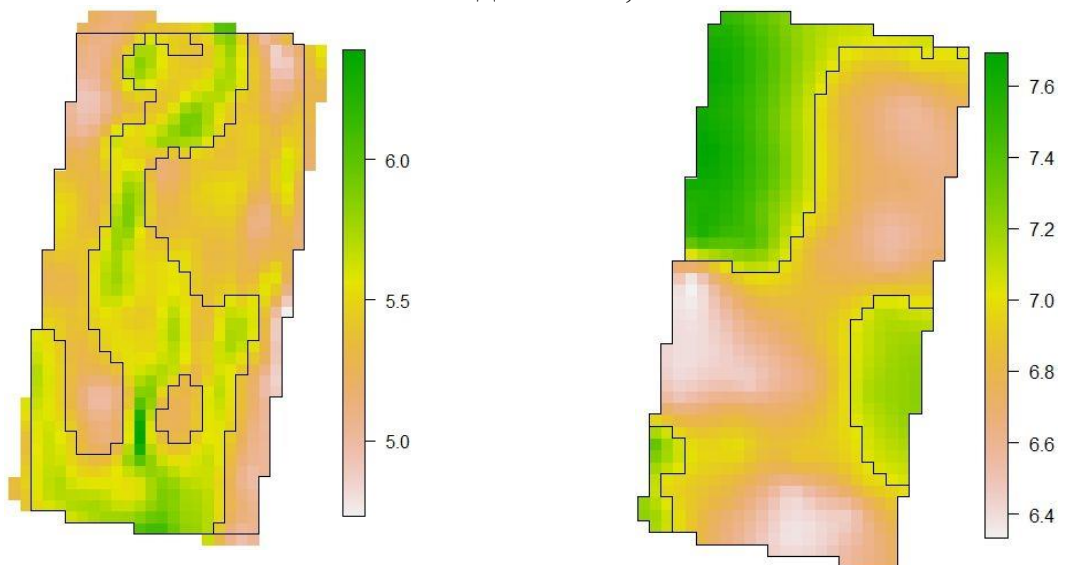
Физическая глина, %



Фосфор подвижный, мг/кг



Калий подвижный, мг/кг



Кислотность

Рисунок 25. Сопоставление карт разных лет с выделенными кластерами для Арского ГСУ.

Для Арского ГСУ в ряде случаев кластеризация приводит к разделению участка на северную и южную части. Форма участка в виде вытянутого полигона, вероятно, способствовала разделению агротехнических мероприятий, выполняемых в ходе сортоиспытания, на две части. К примеру, северная и южная часть четко различается по содержанию гидролизуемого азота. К тому же, если судить по карте содержания физической глины, которая также делит ГСУ на две зоны, то в южной части находится более облегченные по ГМС почвы. Небольшие участки смытых и намытых почв, которые выделялись на почвенной карте 1987, не находят отражение в виде отдельных кластеров. Рельеф в виде слабопологого склона не приводит к развитию эрозионных процессах на этом участке.

Поскольку для опытного дела важным является единообразие почвенного покрова, на котором производится сортоиспытательная деятельность, то была проверена согласованность кластеров почвенных свойств с почвенной картой 1987 года. По результатам классификации были получены оценки каппа-статистики и показатели общей точности.

В случае Арского ГСУ общая точность соответствия почвенных контуров кластерам почвенных свойств варьирует в пределах 30-64% для обследования 1987 года и 33-60% для обследования 2011 года. Тем не менее, согласно статистике каппа, то ни один из кластеров почвенных свойств не согласуется в разумной степени с почвенными контурами (табл. 24). Подобная картина вполне легко объясняется наличием близких по генезису почв на Арском ГСУ. По карте 1987 года выделяются контуры дерново-подзолистых почв и серых лесных почв, однако верхняя часть профиля почв в ходе распашки и сельскохозяйственной деятельности гомогенизировалась, что в свою очередь привело к стиранию различий между выделенными почвенными контурами. Вариабельность почвенных свойств на участке определяется иными факторами, в частности, как было показано выше, рельефом. Тем не менее, поскольку участок мало подвержен эрозионной деятельности, то небольшие промоины, также встречающиеся в юго-

восточной и юго-западной частях участка и которые определены в карте 1987 года отдельными контурами, не вносят существенного вклада ни при определении кластеров, ни при оценке согласия.

Таблица 24

Сравнение пространственного соответствия кластеров почвенных свойств
разновременных обследований контурам почвенной карты

	Почвенный класс			
	1987 год		2011 год	
	Значение каппа	Общая точность	Значение каппа	Общая точность
	Заинский ГСУ			
Гумус	0,31	0,63	0,31	0,61
Азот гидролизуемый	0,24	0,55	0,02	0,36
Фосфор подвижный	0,33	0,63	0,28	0,58
Калий подвижный	0,29	0,58	0,06	0,19
Кислотность	0,23	0,77	0,23	0,74
Физическая глина			0,14	0,35
	Арский ГСУ			
Гумус	-0,01	0,64	-0,09	0,39
Азот гидролизуемый	0,18	0,59	0,26	0,60
Фосфор подвижный	-0,03	0,56	0,02	0,47
Калий подвижный	0,01	0,30	-0,02	0,33
Кислотность	0,04	0,54	0,11	0,45
Физическая глина			0,26	0,60

В случае Заинского ГСУ значение каппа-статистики показывает умеренное соответствие кластеров почвенных свойств контурам почвенной карты для содержания гумуса и подвижного фосфора обследований двух лет, а также содержания подвижного калия для обследования 1987 года. Низкое значение каппа-статистики для содержания гидролизуемого азота обследования 2011 года, в отличие от значения каппа для гидролизуемого азота обследования 1987 года, свидетельствует о незначительном соответствии кластеров азота почвенным контурам вследствие выравнивания почв по содержанию этого элемента. Тем не менее, как было указано выше, отдельный кластер гидролизуемого азота отчетливо соответствует эродированному участку Заинского ГСУ (рис. 24).

Также с использованием каппа-статистики была оценена согласованность между кластерами почвенных свойств для обследований разных лет (табл. 25), что может говорить об изменении зон с близкими значениями целевых показателей за 25 лет сельскохозяйственного использования.

Таблица 25

Оценка согласия кластеров почвенных свойств между обследованиями
1987 и 2011 года

	Гумус	Азот гидро- лизуемый	Фосфор подвижный	Калий подвижный	Кислот- ность
Заинский ГСУ					
Значение каппа	0,35	-0,03	0,55	0,17	0,45
Общая точность	0,64	0,52	0,78	0,34	0,89
Арский ГСУ					
Значение каппа	0,15	0,58	0,28	0,18	0,07
Общая точность	0,54	0,79	0,63	0,5	0,52

Наибольшее соответствие между кластерами обследований разных лет было обнаружено для Заинского ГСУ. В этом ГСУ умеренно согласуются между собой разновременные кластеры для содержания гумуса (каппа=0,35), подвижного фосфора (каппа=0,55) и значений кислотности (каппа=0,45). Полностью не соответствуют друг другу кластеры для содержания гидролизуемого азота, что объясняется, во-первых, внесением низких доз азотных удобрений в 2011 году, по сравнению с использованием минеральных и органических удобрений в конце 1980-х годов, и во-вторых, высокой изменчивостью этого показателя. Для подвижного калия соответствие кластеров является низким. В этом случае, наоборот, в обследовании 2011 года наблюдается выделение большего количества кластеров, чем при обследовании 1987 года. Согласованность кластеров для кислотности почв легко объясняется тем, что выходы карбонатов на поверхность вследствие эрозионной деятельности за 25 лет не исчезли и остаются локализованными на прежних местоположениях (табл. 25).

В случае Арского ГСУ наибольшее значение каппа-статистики между данными обследований двух лет было обнаружено для гидролизуемого азота, наименьшее значение согласованности кластеров отмечено для кислотности почв. Как и в случае Заинского ГСУ для содержания подвижного калия в почвах Арского ГСУ также наблюдается увеличение контрастности на участке, что отражается в увеличении числа кластеров по сравнению с обследованием 1987 года. В целом для Арского ГСУ в 2011 году наблюдается значительное пространственное перераспределение показателей почвенного плодородия по сравнению с предыдущим обследованием, тогда как в случае Заинского ГСУ картина распределения почвенных свойств в пространстве изменяется не так сильно за прошедшее с момента предыдущего обследования время.

Для исключения возможности ошибочного сопоставления разновременных кластеров, также по 200 случайно выбранным точкам с помощью коэффициента корреляции была проведена оценка согласованности цифровых карт разных периодов обследования (табл. 26).

Таблица 26

Коэффициент корреляции между интерполированными картами почвенных свойств для 1987 года и 2011 года по 200 случайным точкам

ГСУ	Гумус	Азот гидро- лизуемый	Фосфор подвижный	Калий подвижный	Кислотность
Заинский	0,62	0,29	0,74	0,58	0,71
Арский	0,62	0,79	0,49	0,59	0,28

Как показывает таблица 26 пространственная структура большинства почвенных свойств двух ГСУ сохраняется по истечении времени. Так в Заинском ГСУ наиболее сопоставимыми между собой являются карты гумуса, подвижных форм фосфора и калия, а также кислотности, тогда как в Арском ГСУ более сопоставимы карты гумуса, гидролизуемого азота и подвижного калия. Пространственные структуры гидролизуемого азота Заинского ГСУ и кислотности Арского ГСУ являются наиболее не похожими

между собой для разновременных карт. Выводы из таблицы 26 во дополняют выводы сопоставления разновременных кластеров.

Результаты оценки пространственной вариабельности почвенных свойств были оформлены в алгоритм построения карт агрохимических свойств почв, обладающих минимальной погрешностью (рис. 26). Алгоритм является модифицированным дополнением схемы, разработанной Zhu с соавт. (Zhu et al., 2010b), В модифицированном алгоритме учитывается как пространственная структура исследуемых свойств, так и техники описания детерминированной части пространственной вариабельности. Он ориентирован на случаи использования большого количества вспомогательных переменных в качестве предикторов цифрового картографирования (Сахабиев и др., 2018).

Алгоритм имеет ряд основных условий, определяющих выбор оптимального способа геостатистической интерполяции почвенных свойств:

а) Основным условием применимости геостатистических методов является достаточное количество наблюдений. Оценки различных авторов о допустимом объеме выборки несколько разнятся, Webster и Oliver показали, что необходимо ≥ 100 точечных данных для проведения вариограммного анализа, и при меньших выборках экспериментальные вариограммы становятся менее надежными (Webster et al., 1992). Zhu и Lin сообщают, что даже при сравнительно небольшом размере выборки (<100), свойства почвы все еще можно разумно интерполировать при использовании правильного метода интерполяции (Zhu et al., 2010b). Учитывая вышеуказанное, можно отметить, что наличие более 100 географически привязанных точечных данных представляют собой наилучший результат, при размере выборки в 60-100 значений все еще возможно получить достоверные карты распределения, а при размере выборки < 60 значений крайне желательно использовать дополнительные данные, имеющие зависимость с целевой переменной. Важно иметь ввиду, что итоговая точность и соответствующее влияние размера выборки зависит от многих факторов: реальная

пространственная структура исследуемого параметра, соотношение расстояния между точками к радиусу автокорреляции, метод интерполяции и наличие зависимости исследуемого параметра с доступными вспомогательными данными (Zhu et al., 2010b).

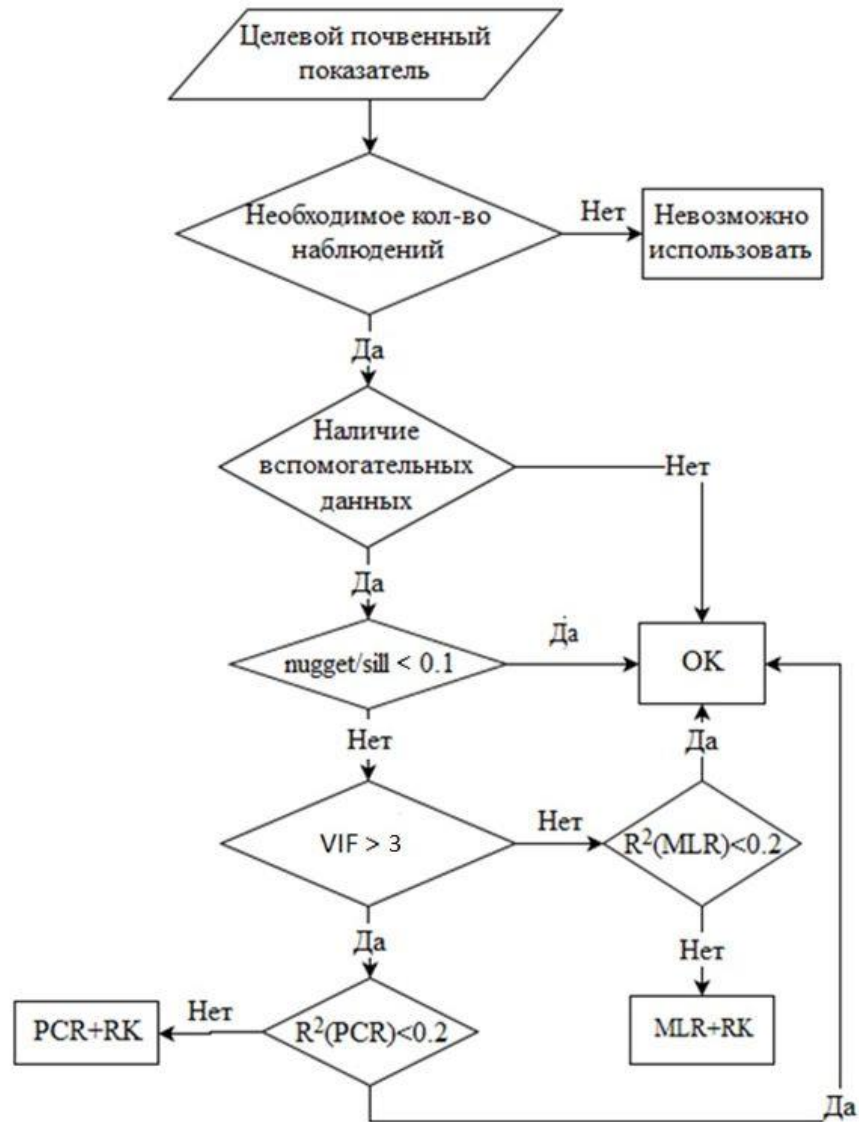


Рисунок 26. Алгоритм геостатистического построения карт агрохимических свойств почв

б) Соотношение наггета к порогу (nugget/sill) отражает силу пространственной структуры (Cambardella et al., 1994). При сильной пространственной зависимости (nugget/sill < 0,1) метод ординарного

кригинга имеет более высокую точность интерполяции при достаточном количестве точек обследования.

в) Оценки множественной линейной регрессии нестабильны при наличии сильной корреляции между вспомогательными данными (James et al., 2013). Мультиколлинеарность неизбежна при наличии большого количества параметров рельефа, рассчитанных на основе цифровой карты высот. Мультиколлинеарность данных должна быть анализирована с помощью анализа фактора инфляции дисперсии (VIF). Метод регрессии на главные компоненты использует вместо оригинальных значений предикторов их трансформированные значения, позволяет устранить мультиколлинеарность между ними и уменьшить размерность данных. Стоит отметить, что из-за особенностей трансформации, метод интерполяции, основанный на PCR, может давать более «шумную» картину распределения. Таким образом, в случае если значение VIF соответствует трем, применение метода PCR является не рациональным, необходимо использовать множественную линейную регрессию. В случае если VIF показывает значения больше трех, то необходимо использовать методы, позволяющие убрать ограничить мультиколлинеарность.

г) Отсутствие или слабая зависимость целевой переменной от вспомогательных данных отразится в низком значении коэффициента детерминации регрессионной модели. При $R^2 < 0,2$, преимущества в точности методов MLR RK и PCR RK будут незначительны.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что исследуемые сортоучастки (Заинский и Арский ГСУ, расположенные в Республике Татарстан), в малой степени различаются по гранулометрическому составу, но сильно различаются по почвенному покрову (дерново-подзолистые и серые лесные почвы в Арском ГСУ и черноземы в Заинском ГСУ). Различия наблюдаются и по величинам почвенных свойств. Среднее значение гумуса в Заинском ГСУ равно 6,9%, в Арском ГСУ – 3,0 %, гидролизуемого азота – 206 мг/кг и 111 мг/кг, подвижных калия и фосфора 176 мг/кг и 250 мг/кг, а также 499 мг/кг и 239 мг/кг, соответственно. Среднее значение кислотности в Заинском ГСУ равно 6,4 ед., в Арском ГСУ – 6,9 ед., физической глины – 51% и 41%, соответственно.

2. Обнаружено, что вариабельность почвенных свойств двух ГСУ практически одинакова: средняя для гумуса и гидролизуемого азота, очень высокая для подвижного фосфора, низкая для кислотности. Вариабельность подвижного калия в Заинском ГСУ средняя, а в Арском ГСУ – сильная, тогда как вариабельность физической глины больше в Заинском ГСУ (средняя), чем в Арском ГСУ (очень низкая). Коэффициенты вариации значимо различаются для гидролизуемого азота, подвижного калия и физической глины.

3. Разработаны картографические модели для оценки и картирования пространственной неоднородности агрохимических свойств почв и содержания физической глины с помощью методов цифровой почвенной картографии, которые включают вариограммный анализ оригинальных и стандартизированных переменных, моделирование с помощью регрессионного кригинга с множественной линейной регрессией на оригинальных переменных и на главных компонентах, выбор наилучших моделей, интерполяцию и оценку точности моделей, пространственную кластеризацию с применением критериев нечеткой логики и сравнение цифровых карт.

4. Показано, что ГСУ, находящиеся на территории с различным почвенным покровом, но испытывающие сопоставимое антропогенное влияние в виде сельскохозяйственной деятельности, имеют близкие значения расстояний взаимозависимости (около 480 – 840 м) свойств почв. Пространственные зависимости более выражены в Заинском ГСУ.

5. Выявлены ведущие морфометрические характеристики рельефа, оказывающие влияние на плодородие почв в пределах сортоиспытательных участков, находящихся в разных природно-климатических зонах (Западное Предкамье и Восточное Закамье) Республики Татарстан. В Заинском ГСУ регрессионные модели на основе морфометрических характеристик рельефа могут объяснить 23 – 54% варьирования свойств почв. Преимущественное влияние оказывают морфометрические характеристики рельефа, которые позволяют разделить склоновые и равнинные участки, характеризуют направление и силу распределения вещества в ландшафте, а также выпуклость поверхности. В Арском ГСУ в моделях регрессии участвуют параметры, которые отражают относительную высоту, а также локальную расчленённость рельефа. Наибольшее влияние рельеф оказывает на пространственное распределение кислотности ($R^2_{\text{скор.}} = 0,4$), модели остальных показателей, кроме физической глины ($R^2_{\text{скор.}} = 0,13$), имеют значения $R^2_{\text{скор.}}$ в пределах 0,26 – 0,37.

6. Обнаружено, что пространственная структура почвенных показателей является устойчивой во времени. После 25 лет сельскохозяйственного использования пространственные зависимости почвенных свойств Заинского ГСУ остаются сильными, их значение составляет более 75% для обоих моментов исследования. Лишь для содержания гумуса пространственная зависимость изменяется с умеренной (63%) в 1987 году до сильной (98%) в 2011 году. В Арском ГСУ сильная пространственная зависимость наблюдается для подвижного фосфора (98 – 100%) и кислотности (100%), для подвижного калия она снижается с 63% в

1987 году до 45% в 2011 году, но остается умеренной. Пространственная зависимость содержания гумуса в оба года слабая и составляет 24%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкина, С.С. Методы определения подвижных фосфатов на черноземах Сибири / С.С. Аверкина. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 125 с.
2. Ачасов, А.Б. Влияние рельефа на гумусированность черноземов / А.Б. Ачасов // Почвоведение. – 2006. - №9. – С. 1036-1042.
3. Бабаян, Л.А. Плодородие светло-каштановой почвы на различных элементах рельефа / Л.А. Бабаян, В.М. Протопопов // Почвоведение. – 1997, - №10. - С.1245-1249.
4. Басевич, В.Ф. Неоднородность подзолистых почв в биогеоценозах южной тайги: автореф. дис. ... докт. биол. наук: 03.00.13 / Виктор Францевич Басевич. – М.: 2011. - 51 с.
5. Башкин, В.Н. Дифференциация почв и содержание в них подвижных форм некоторых биофильных элементов в связи с рельефом / В.Н. Башкин, О.А. Лучицкая, М.Я. Козлов, О.Н. Волошина // Почвоведение. – 1991. - №12. – С. 15-23.
6. Благовещенский, Ю.Н. Пространственная изменчивость мощности подстилки в лесах Карелии / Ю.Н. Благовещенский, Л.Г. Богатырев, Е.А. Соломатова, В.П. Самсонова // Почвоведение. – 2006. - №9. – С. 1029-1035.
7. Братчиков, В.Г. Почвенно-агрохимический очерк Арского ГСУ Татарской АССР / В.Г. Братчиков, Г.Н. Балахчев, К.Ш. Шакиров. – Казань, 1986. – 87 с.
8. Геннадиев, А.Н. География почв с основами почвоведения / А.Н. Геннадиев, М.А. Глазовская. - М.: Высшая школа, 2005. - 461 с.
9. Геоestatистика и география почв / Ин-т биологии КарНЦ РАН. - М.: Наука, 2007. - 175 с.
10. Гинзбург, К.Е. Методы определения фосфора в почве / К.Е. Гинзбург // Агрохимические методы исследования почв. – М.: Наука, 1975. – С. 106–187.

11. Готра, О.Н. Структура пространственной неоднородности содержания гумуса в пахотном слое дерново-подзолистой почвы в пределах одного поля: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27, 06.01.03 / Ольга Николаевна Готра. – М.: 2005. - 24 с.

12. Григорьев, Г.И. Элементарная структура (пятнистости и комплексности) почвенного покрова в подзолистой и лесостепной зонах / Г.И. Григорьев, Л.П. Рубцова, М.Г. Синицина, Н.П. Сорокина, Г.А. Шершукова, И.Г. Шубина // Структура почвенного покрова и методы ее изучения: сборник трудов. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1973. – С. 27-40.

13. Гумматов, Н.Г. Геоestatистический анализ пространственной изменчивости водоудерживающей способности серой лесной почвы / Н.Г. Гумматов, С.В. Жиромский, Е.В. Мироненко, Я.А. Пачепский, Р.А. Щербаков // Почвоведение. - 1992. - №6. - С. 52-62.

14. Дмитриев, Е.А. Глава из неоконченной книги «Неоднородность почвы» / Е.А. Дмитриев // Масштабные эффекты при исследовании почв. М.: Изд-во МГУ, 2001а. - С. 8-38.

15. Дмитриев Е.В. Закономерности пространственной неоднородности состава и свойств почв: автореф. дис. ... докт. биол. наук: 06.01.03 / Евгений Анатольевич Дмитриев. – М.: 1983. - 54 с.

16. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении/ Е.А. Дмитриев. М.: МГУ, 1995. - 320 с.

17. Дмитриев, Е.А., Пространственно-временная неоднородность почв и погрешности экстраполяционных оценок средних значений влажности и pH / Е.А. Дмитриев, А.В. Николенко // Вестник МГУ. Сер 17. Почвоведение. - 1996. - №4. - С.3-14.

18. Дмитриев Е.А. Теоретические и методологические проблемы почвоведения / Е.А. Дмитриев. - М.: ГЕОС., 2001б.- 377 с.

19. Добровольский, Г.В. География почв / Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская. - М.: Изд-во МГУ, Изд-во "КолосС", 2004. - 460 с.

20. Ефремова, Т.Т. Геоestatистический анализ пространственной изменчивости запасов зольных веществ в подстилке болотных березняков Западной Сибири / Т.Т. Ефремова, О.П. Секретенко, А.Ф. Аврова, С.П. Ефремов // Почвоведение. - 2013. - №1. - С. 56-66.

21. Жоголев, А.В. Актуализация региональных почвенных карт на основе спутниковых и геоинформационных технологий (на примере Московской области): дис. ... канд. с.-х. наук: 03.02.13 / Арсений Вадимович Жоголев. – М., 2016. - 203 с.

22. Иванникова, Л.А. Теория регионализированных переменных при исследовании пространственной вариабельности показателей агрохимических свойств почвы / Л.А. Иванникова, Е.В. Мироненко // Почвоведение. – 1988. - №5. – С. 113-127.

23. Карпачевский, Л.О. Некоторые методические аспекты учета пространственной неоднородности в почвоведении / Л.О. Карпачевский // Масштабные эффекты при исследовании почв. - М.: Изд-во МГУ, 2001. – С. 39-46.

24. Ковда, В.А. Биогеохимия почвенного покрова / В.А. Ковда. - М.: Наука, 1985. - 264 с.

25. Козлов, Д.Н. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии / Д.Н. Козлов, Н.П. Сорокина // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: сборник статей. - М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. - С. 35-53.

26. Козловский, Ф.И. Теория и методы изучения почвенного покрова / Ф.И. Козловский. - М.: ГЕОС, 2003. - 536 с.

27. Королёва, И.Е. Опыт выделения почвенно-агрохимических ареалов на пашне и их связь с рельефом и продуктивностью растений / И.Е. Королёва, А.С. Фрид // Почвоведение. - 2006. - №12, 2006. – С. 1492-1500.

28. Костюкевич, И.И. Почвенно-агрохимический очерк Заинского ГСУ Татарской АССР / И.И. Костюкевич, К.Ш. Шакиров. – Казань, 1987. – 62 с.

29. Красильников, П.В. Вариография дискретных почвенных свойств / П.В. Красильников // Экология и география почв. - Петрозаводск: Изд-во Института биологии КарНЦ РАН, 2009. - С. 10–30.

30. Крыщенко, В.С. Применение ГИС-технологий для мониторинга земель Заинского государственного сортоиспытательного участка Республики Татарстан / В.С. Крыщенко, О.М. Голозубов, И.А. Сахабиев, Ю.А. Литвинов // Вестник Томского государственного университета. - 2013. - №366. - С. 180-183.

31. Кузякова, И.Ф. Влияние микрорельефа на пространственное варьирование содержания гумуса в дерново-подзолистой почве в условиях длительного полевого опыта / И.Ф. Кузякова, Я.В. Кузяков // Почвоведение. – 1997.- №7. – С. 823-830.

32. Кузякова, И.Ф. Метод геостатистики в почвенно-агрохимических исследованиях / И.Ф. Кузякова, В.А. Романенков, Я.В. Кузяков // Почвоведение. – 2001а. - №9. - С. 1132-1139.

33. Кузякова, И.Ф. Применение метода геостатистики при обработке результатов почвенных и агрохимических исследований / И.Ф. Кузякова, В.А. Романенков, Я.В. Кузяков // Почвоведение. - 2001б. - №9. - С. 1365-1376.

34. Ландшафты Республики Татарстан: региональный ландшафтно-экологический анализ / Ермолаев О. П. и др.— Казань: Слово, 2007.— 410 с.

35. Линник, В.Г. Пространственный анализ и геостатистическое моделирование распределения техногенных радионуклидов в пойменных почвах реки Енисей / В.Г. Линник, А.А. Савельев // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: сборник статей. - М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. - С. 211-221.

36. Матерон, Ж. Основы прикладной геостатистики /Ж. Матерон. — М.: Мир, 1968. — 408 с

37. Мелиховская, П.В. Изучение пространственной изменчивости свойств почв геостатистическими методами: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13 / Полина Владимировна Мелиховская. - М.:2011. - 21 с.

38. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. - М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. - 240 с.

39. Мешалкина, Ю.Л. Геостатистика в почвоведении и экологии / Ю.Л. Мешалкина, Васенев И.И., Кузякова И.Ф., Романенков В.А. – М.: РГАУ-МСХА, 2010. – 98 с.

40. Мешалкина, Ю.Л., Что такое «цифровая почвенная картография»? (обзор) / Ю.Л. Мешалкина // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: сборник статей. - М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. - С. 9-18.

41. Минаев Н.В. Цифровая модель почвенно-ландшафтных связей Владимирского Ополя: диссертация ... кандидата биологических наук: 03.02.13 / Минаев Николай Викторович. – Москва, 2020. 149 с.

42. Михеева, И.В. Пространственные флуктуации и вероятностно-статистические распределения свойств каштановых почв Кулундинской степи / И.В. Михеева // Почвоведение. – 2005. - № 3. -С. 316-327.

43. Никитина, Л.В. Сравнение методов оценки калийного состояния дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава / Л.В. Никитина, Лукин С.М., Листова М.П. // Плодородие. -2013, - №6. - С. 11-13.

44. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования. – М.: «Колос», 1973. – 95 с.

45. Орешкина, Н.С. Статистические оценки пространственной изменчивости свойств почв / Н.С. Орешкина. - М.: Изд-во МГУ, 1988. - 112 с.

46. Почвы сортоучастка № 228 Акташского Татарской АССР: очерк. – М., 1939. – 22 с.

47. Преснякова, Г.А. Почвы Арского сортоучастка № 1255 Татарской АССР / Г.А. Преснякова. – М., 1952. – 65 с.

48. Розанов, Б.Г. Морфология почв / Б.Г. Розанов. - М.: Академический проект, 2004. - 432 с.

49. Руководство по среднемасштабному картографированию почв на основе ГИС / под ред. М.С. Симаковой. - М.: Почв., ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. - 243 с.

50. Рухович О. В. Оптимизация параметров прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур с использованием многофакторных моделей и ГИС-технологий на основе полевых опытов с удобрениями Агрохимслужбы и Геосети: диссертация ... доктора биологических наук: 06.01.04 / Рухович Ольга Владимировна. - Москва, 2016. - 348 с.

51. Савельев, А.А. Геостатистический анализ данных в экологии и природопользовании (с применением пакета R): Учебное пособие / А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, А.Г. Пилюгин, Н.А. Чижилова. – Казань: Казанский университет, 2012а. – 120 с.

52. Савельев, А.А. Оценка почвенного плодородия по данным дистанционного зондирования Земли / А.А. Савельев, Б.Р. Григорьян, Д.В. Добрынин, С.С. Мухарамова, В.И. Кулагина, И.А. Сахабиев // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2012б. - Т. 154. - №3. - С. 158-172.

53. Савин, И.Ю. Использование спутниковых данных для составления почвенных карт: современные тенденции и проблемы / И.Ю. Савин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2016. - Т. 13. - № 6. - С. 29–39.

54. Савин, И.Ю. Компьютерная имитация картографии почв / И.Ю. Савин // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: сборник статей. - М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. - С. 26-34.

55. Самсонова, В.П. Использование эмпирического Байесовского кригинга для выявления неоднородностей распределения органического углерода на сельхозугодьях / В.П. Самсонова, Ю.Н. Благовещенский, Ю.Л. Мешалкина // Почвоведение. – 2017. - №3. – С. 321-328.

56. Самсонова, В.П. Оценка роли рельефа в пространственной изменчивости агрохимически важных почвенных свойств для интенсивно обрабатываемого сельскохозяйственного угодья / В.П. Самсонова, Мешалкина Ю.Л. // Вестник Московского университета. - 2014. - Серия 17: Почвоведение. - №3. - С. 36-44.

57. Самсонова, В. П. Пространственная вариабельность состава и свойств дерново-подзолистой почвы: диссертация ... доктора биологических наук: 03.00.27 / Вера Петровна Самсонова. - Москва, 2003. - 415 с

58. Самсонова, В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: На примере дерново-подзолистых почв / В.П. Самсонова. — М.: Издательство ЛКИ, 2008. — 160 с.

59. Самсонова, В.П. Часто встречающиеся неточности и ошибки применения статистических методов в почвоведении / В.П. Самсонова, Ю.Л. Мешалкина // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. - 2020. - Вып. 102. - С. 164-182.

60. Сахабиев, И.А. Выбор метода геостатистической интерполяции свойств почв государственных сортоиспытательных участков при использовании параметров цифровой модели рельефа / И.А. Сахабиев, С.С. Рязанов, Т.Г. Кольцова, Б.Р. Григорьян // Почвоведение. – 2018. - №3. – С. 259 – 273.

61. Сахабиев, И.А. Исследование пространственной изменчивости свойств почв с использованием геостатистического подхода / И.А. Сахабиев, С.С. Рязанов // Российский журнал прикладной экологии. - 2015. - №2(2). - С. 32-37.

62. Сахабиев, И.А. Оценка пространственной вариабельности свойств почвенного покрова территории государственной сортоиспытательной сети / И.А. Сахабиев, С.С. Рязанов, Б.Р. Григорьян // Плодородие. – 2017. - №2(95). – С. 26-31.

63. Свидзинская, Д. Основные геоморфометрические параметры: теория [Электронный ресурс] / Д. Свидзинская // GIS-Lab. Географические

информационные системы и дистанционное зондирование. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>. (дата обращения: 16.11.2021)

64. Сидорова, В.А. Геостатистический анализ характеристик почв и урожайности в полевом опыте по точному земледелию / В.А. Сидорова, Е.Е. Жуковский, П.В. Лекомцев, В.В. Якушев // Почвоведение. - 2012. - №8. - С. 879-888.

65. Сидорова, В.А. Динамика пространственного варьирования почвенных свойств луговых агроценозов Карелии при постантропогенном развитии / В.А. Сидорова // Российский журнал прикладной экологии. – 2016. - №3. – С.23-27.

66. Сидорова, В.А. Почвенно-географическая интерпретация пространственной variability химических и физических свойств поверхностных горизонтов почв степной зоны / В.А. Сидорова, П.В. Красильников// Почвоведение. - 2007. - №10. - С. 1168-1178.

67. Симакова, М.С. От визуального дешифрирования аэрофотоснимков и полевого картографирования почв до автоматизированного дешифрирования и картографирования по космическим снимкам / М.С. Симакова // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. - 2014. - Вып. 74. - С. 3-19. [дать ссылку](#)

68. Сычев, В.Г. Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования / В.Г. Сычев. М.: РАН, 2019.-325 с.

69. Терехов, А.Г. Методика оценки содержания гумуса в пахотных землях Северного Казахстана на основе спутниковых данных / А.Г. Терехов, А.М. Кауазов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2007. - Т.2. - Вып.4. - С. 358-364.

70. Филиппова, Т.Е. Влияние рельефа на пространственное изменение показателей плодородия почв мелиорированного конечно-моренного агроландшафта / Т.Е. Филиппова, Ю.П. Соколов, Г.Ю. Рабинович, Е.А.

Кузьмин, О.В. Корнеева, Л.А. Шахпаронян // Почвоведение. - 2006. - №6. – С. 741-750.

71. Флоринский, И.В. Гипотеза Докучаева как основа цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125-летию публикации) / И.В. Флоринский // Почвоведение. – 2012а. - №4. –С. 500-506.

72. Флоринский, И.В. Гипотеза Докучаева – центральная идея цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125-летию публикации) / И.В. Флоринский // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: сборник статей. - М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012б. - С. 19-25.

73. Флоринский, И.В. Картографирование почвы на основе цифрового моделирования рельефа (по данным кинематических GPS -съемок и почвенных наземных съемок) / И.В. Флоринский // Исследование Земли из космоса. – 2009. - №6. - С. 56–65.

74. Фрид, А.С. Пространственное варьирование и временная динамика плодородия почв в длительных полевых опытах / А.С. Фрид. – М.: Россельхозакадемия, 2002. - 80 с.

75. Фридланд, В.М., Структура почвенного покрова / В.М. Фридланд. - М.: Мысль, 1972. - 423 с.

76. Хитров, Н.Б. Создание детальных почвенных карт на основе интерполяции данных о свойствах почв / Н.Б. Хитров // Почвоведение. – 2012. - №10. - С. 1045-1056.

77. Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: сборник статей. - М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. – 350 с.

78. Шарый, П.А. Геоморфометрический анализ пространственной изменчивости почв и экосистем: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Петр Александрович Шарый. - Ростов-на-Дону, 2016. - 319 с.

79. Шарый, П.А. Геоморфометрия в науках о земле и экологии, обзор методов и приложений / П.А. Шарый // Известия Самарского научного центра РАН. – 2006. - №8(2). – С. 458-473.

80. Шарый, П.А. Статистическая оценка связи пространственной изменчивости содержания органического углерода в серой лесной почве с плотностью, концентрациями металлов и рельефом / П.А. Шарый, Д.Л. Пинский // Почвоведение. - 2013. - №11. - С. 1344-1356.

81. Шеин, И.В. Математическое моделирование в почвоведении / И.В. Шеин, И.М. Рыжова. - М.: «ИП Маракушев А.Б.», 2016. – 377 с.

82. Якименко, В.Н. К вопросу оценки калийного состояния агроценозов / В.Н. Якименко // Плодородие. -2009, - №4. - С. 8-10.

83. Abdel-Kader, F.H. Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: A multinomial logistic regression approach / F.H. Abdel-Kader // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. – 2011. - Vol.14. – P. 29–40.

84. Adhikari, K. Digital Mapping of Soil Organic Carbon Contents and Stocks in Denmark / K. Adhikari, A.E. Hartemink, B. Minasny, R. Bou Kheir, M.B. Greve // PLoS ONE. – 2014. - Vol.9. - №8. – P. 1-13.

85. Banerjee, S. Hierarchical Modeling and Analysis for Spatial Data / S. Banerjee, B.P. Carlin, A.E. Gelfand. - NY: CRC Press, 2014. - 584 p.

86. Baveye, P.C. Moving away from the geostatistical lamppost: Why, where, and how does the spatial heterogeneity of soils matter? / P.C. Baveye, M. Laba // Ecological Modelling. - 2015. - Vol. 298. - P.24–38.

87. Bellon-Maurel, V. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy / V. Bellon-Maurel, E. Fernandez-Ahumada, B. Palagos, J.-M. Roger, A. McBratney // TrAC Trends in Analytical Chemistry. - 2010. - Vol.29. – P. 1073–1081.

88. Benedetto, D D. Integrating geophysical and geostatistical techniques to map the spatial variation of clay / D. D. Benedetto, A. Castrignano, D. Sollitto, F. Modugno, G. Buttafuoco, G. Papa // *Geoderma*. – 2012. - Vol.171-172. P. 53–63.
89. Bishop, T.F.A. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps / T.F.A. Bishop, A.B. McBratney // *Geoderma*. - 2001. - Vol.103. - P. 149-160.
90. Bishop, T.F.A. Validation of digital soil maps at different spatial supports / T.F.A. Bishop, A. Horta, S.B. Karunaratne // *Geoderma*. – 2015. - Vol.241–242. – P. 238–249.
91. Bivand, R.S. *Applied Spatial Data Analysis with R* / R.S. Bivand, E. Pebesma, V. Gómez-Rubio. - Springer, 2013. – 414 p.
92. Bock, M. Methods for creating Functional Soil Databases and applying Digital Soil Mapping with SAGA GIS / M. Bock, J. Boehner, O. Conrad, R. Koethe, A. Ringeler // *Status and prospect of soil information in south-eastern Europe: soil databases, projects and applications*. - EUR 22646 EN Scientific and Technical Research series, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 2007. - P.149-162.
93. Borcard, D. *Numerical Ecology with R* / D. Borcard, F. Gillet, P. Legendre. - Springer, 201. – 319 p.
94. Bourennane, H. Comparative performance of classification algorithms for the development of models of spatial distribution of landscape structures / H. Bourennane, A. Couturier, C. Pasquier, C. Chartin, F. Hinschberger, J.-J. Macaire, S. Salvador-Blanes // *Geoderma*. – 2014. - Vol.219–220. – P. 136–144.
95. Brevik, E.C. Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions / E.C. Brevik, C. Calzolari, B.A. Miller, P. Pereira, C. Kabala, A. Baumgarten, A. Jordán // *Geoderma*. – 2016. – Vol.264. - Part B. – P.256-274.
96. Burt, J.E. *Elementary Statistics for Geographers* / J.E. Burt, G.M. Barber, D.L. Rigby. - The Guilford Press, 2009. – 669 p.

97. Cai, X. Spatial autocorrelation of topographic index in catchments / X. Cai, D. Wang // *Journal of Hydrology*. – 2006. - Vol.328. – P. 581-591.
98. Cambardella, C. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils / C. Cambardella, T. Moorman, J. Novak, T. Parkin, D. Karlen, R. Turco, A. Konopka // *Soil Sci. Soc. Am. J.* - 1994. - Vol.58. - P. 1501-1511.
99. Castaldi, F. Estimation of soil properties at the field scale from satellite data: a comparison between spatial and non-spatial techniques / F. Castaldi, R. Casa, A. Castrignano, S. Pascucci, A. Palombo, S. Pignatti // *European Journal of Soil Science*. – 2014. - Vol.65. – P. 842–851.
100. Chai, X. Spatial prediction of soil organic matter in the presence of different external trends with REML-EBLUP / X. Chai, C. Shen, X. Yuan, Y. Huang // *Geoderma*. 2008. - Vol.148. – P. 159–166.
101. Cimmery, V. User Guide for SAGA (version 2.0.5) [Электронный ресурс] / V. Cimmery, 2010. – Режим доступа: https://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/SAGA%20-%20Documentation/Tutorials/Multi_Criteria_Evaluation_Tutorial/. (дата обращения: 16.11.2021)
102. Conrad, O. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. / O. Conrad, B. Bechtel, M. Bock, H. Dietrich, E. Fischer, L. Gerlitz, J. Wehberg, V. Wichmann, J. Boehner // *Geosci. Model Dev.* - 2015. - Vol.8. - P. 1991-2007.
103. DiMaggio, C. Spatial Epidemiology Notes. Applications and Vignettes in R / C. DiMaggio. – NY: Columbia University, 2014. - 178 p.
104. Eisank, C. Assessment of multiresolution segmentation for delimiting drumlins in digital elevation models / C. Eisank, M. Smith, J. Hillier // *Geomorphology*. – 2014. - Vol.214. – P. 452-464.
105. El-Sheimy, N. Digital terrain modelling: Acquisition, Manipulation and Applications / N. El-Sheimy, C. Valeo, A. Habib. - Boston: Artech House, 2005. - 257 p.

106. Evans, D.M. Digital soil mapping of a red clay subsoil covered by loess / D.M. Evans, A.E. Hartemink // *Geoderma*. – 2014. - Vol.230–231. – P. 296–304.
107. Fischer, M.M. Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Methods and Applications / M.M. Fischer, A. Getis. – Berlin: Springer, 2010. – 828 p.
108. Florinsky, I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology / I.V. Florinsky. – Amsterdam: Elsevier / Academic Press, 2012. - 379 p.
109. Florinsky, I.V. Prediction of soil properties by digital terrain modeling / I.V. Florinsky, R.G. Eilers, G.R. Manning, L.G. Fuller // *Environmental Modelling & Software*. – 2002. - Vol.17. – P. 295–311.
110. Fortin, M.J. Spatial Analysis.A Guide for Ecologist / M.J. Fortin, M. Dale. - Cambridge University Press, 2005. - 381 p.
111. Gallant, J.C. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas / J.C. Gallant, T.I. Dowling // *Water Resour. Res.* – 2003. - Vol.39. – P. 1347–1370.
112. Glossary of Soil Science Terms. – Madison: Soil Science Society of America, 2008. - 87 p.
113. Goovaerts, P. Geostatistics for Natural Resource Evaluation / P. Goovaerts, New York: Oxford University Press, 1997. - 483 p.
114. Grunwald, S. Digital soil mapping and modeling at continental scales: finding solutions for global issues / S. Grunwald, J.A. Thompson, J.L. Boettinger // *Soil Sci. Soc. Am. J.* - 2011. - Vol.75. - 1201-1213.
115. Grunwald, S. Environmental Soil–Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics / S. Grunwald. - Boca Raton: CRC Press, 2006. - 506 p.
116. Grunwald, S. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches / S. Grunwald // *Geoderma*. – 2009. - Vol.152. - P.195-207.
117. Haining, R.P. Spatial Data Analysis Theory and Practice / R.P. Haining. - Cambridge University Press, 2003. - 454 p.

118. Hartemink, A.E. A soil science renaissance / A.E. Hartemink, A.B. McBratney // *Geoderma*. – 2008. – Vol.148. – P. 123–129.
119. Hengl, T. About regression-kriging: From equations to case studies / T. Hengl, G.B.M. Heuvelink, D.G. Rossiter // *Computers & Geosciences*. – 2007a. – Vol.33 - P. 1301–1315.
120. Hengl, T. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging / T. Hengl, G.B.M. Heuvelink, A. Stein // *Geoderma*. – 2004. – Vol.120. – P.75–93.
121. Hengl, T. A Practical Guide to Geostatistical mapping / T. Hengl, Amsterdam: University of Amsterdam, 2009. – 271 p.
122. Hengl, T. A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables / T. Hengl. - Ispra (Italy): EC JRC, 2007. - 165 p.
123. Hengl, T. Geomorphometry: concepts, software, applications. Developments in Soil Science / T. Hengl, H.I. Reuter. - Amsterdam: Elsevier, 2008. - Vol.33. - 765 pp.
124. Hengl, T. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: Lessons from Iran / T. Hengl, N. Toomanian, H.I. Reuter, M. J. Malakouti // *Geoderma*. – 2007b. – Vol.140. – P. 417–427.
125. Heuvelink, G.B.M. Modelling soil variation: past, present, and future / G.B.M. Heuvelink, R. Webster // *Geoderma*. – 2001. – Vol.100. – P.269–301.
126. Iwahashi, J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature / J. Iwahashi, R.J. Pike // *Geomorphology*. – 2007. – Vol.86. – P. 409–440.
127. James, G. An introduction to Statistical Learning with Applications in R / G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani. – London: Springer, 2013. – 440 p.
128. Kerry, R. Comparing sampling needs for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood / R. Kerry, M.A. Oliver // *Geoderma*. – 2007. – Vol.140. – №4. – P. 383-396.

129. Keskin, H. Regression kriging as a workhorse in the digital soil mapper's toolbox / H. Keskin, S. Grunwald // *Geoderma*. – 2018. – Vol.326. – P. 22–41.
130. Kravchenko, A.N. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties / A.N. Kravchenko, D.G. Bullock // *J. Agronomy*. – 1999. - Vol.91. – P. 393–400.
131. Kuhn, M. *Applied Predictive Modelling* / M. Kuhn, K. Jonson. - New York: Springer Science+Business Media, 2013. - 600 p.
132. Kumar, S. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock / S. Kumar, R. Lal, D. Liu // *Geoderma*. – 2012. - Vol.189–190. – P. 627–634.
133. Lacoste, M. High resolution 3D mapping of soil organic carbon in a heterogeneous agricultural landscape / M. Lacoste, B. Minasny, A. McBratney, D. Michot, V. Viaud, C. Walter // *Geoderma*. – 2014. - Vol.213. – P. 296–311.
134. Lagacherie, P. *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective* / P. Lagacherie, A. McBratney, M. Voltz. - Amsterdam: Elsevier, 2006. - 658 p.
135. Lark, R.M. Soil-landform relationships at within-field scales: an investigation using continuous classification / R.M. Lark // *Geoderma*. – 1999. - Vol. 92. - P. 141–165.
136. Lark, R.M. Towards soil geostatistics / R.M. Lark // *Spatial Statistics*. - 2012. - Vol.1. – P. 92–99.
137. Legendre, P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? / P. Legendre // *Ecology*. – 1993. - Vol.74. - №6. – P. 1659-1673.
138. Legendre, P. Spatial pattern and ecological analysis / P. Legendre, M.J. Fortin // *Vegetatio*. – 1989. - Vol.80. - №2. – P. 107-138.
139. Levi, M.R. Covariate selection with iterative principal component analysis for predicting physical soil properties / M.R. Levi, C. Rasmussen // *Geoderma*. – 2014. - Vol.219–220. – P. 46–57.

140. Li, H.Y. Modelling the electrical conductivity of soil in the Yangtze delta in three dimensions / H.Y. Li, B.P. Marchant, R. Webster // *Geoderma*. – 2016. - Vol.269. – P. 119–125.
141. Li, J. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists / J. Li, A.D. Heap. - *Geoscience Australia*, 2008. - 137 p.
142. Li, J. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review / J. Li, A.D. Heap // *Environmental Modelling & Software*. – 2014. - Vol.53. – P. 173-189.
143. Li, Y. Can the spatial prediction of soil organic matter contents at various sampling scales be improved by using regression kriging with auxiliary information? / Y. Li // *Geoderma*. – 2010. - Vol.159. - P.63–75.
144. Li, Y. Spatial linear mixed models with covariate measurement errors / Y. Li, H. Tang, X. Lin / *Statistica Sinica*. – 2009. – Vol.19. – P. 1077-1093.
145. Ließ, M. Uncertainty in the spatial prediction of soil texture comparison of regression tree and Random Forest models / M. Ließ, B. Glaser, B. Huwe // *Geoderma*. – 2012. - Vol.170. – P. 70–79.
146. Liu, F. Soil texture mapping over low relief areas using land surface feedback dynamic patterns extracted from MODIS / F. Liu, X. Geng, A-X. Zhu, W. Fraser, A. Waddell // *Geoderma*. – 2013. – Vol.171–172. - P. 44–52.
147. Liu, Y. Comparing geospatial techniques to predict SOC stocks / Y. Liu, L. Guo, Q. Jiang, H. Zhang, Y. Chen // *Soil & Tillage Research*. – 2015. - Vol.148. – P. 46–58.
148. López-Granados, F. Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties / F. López-Granados, M. Jurado-Expósito, J.M. Peña-Barragán, L. García-Torres // *Europ. J. Agronomy*. – 2005. - Vol.23. – P. 279–289.
149. Maynard, J.J. Uncoupling the complexity of forest soil variation: Influence of terrain indices, spectral indices, and spatial variability / J.J. Maynard, M.G. Johnson // *Forest Ecology and Management*. – 2016. – Vol.369. – P. 89–101.

150. McBratney, A.B. An overview of pedometric techniques for use in soil survey / A.B. McBratney, I.O.A. Odeh, T.F.A. Bishop, M.S. Dunbar, T.M. Shatar // *Geoderma*. – 2000. - Vol.97. – P. 293-327.
151. McBratney, A.B. Application of fuzzy sets in soil science: Fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions / A.B. McBratney, I.O.A. Odeh // *Geoderma*. – 1997. - Vol. 77(2-4). - P. 85-113.
152. McBratney, A.B. On digital soil mapping / A.B. McBratney, M.L. Mendonça Santos, B. Minasny // *Geoderma*. – 2003. - Vol.117. – P. 3– 52.
153. McKenzie, N.J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation / N.J. McKenzie, P.J. Ryan // *Geoderma*. – 1999. - Vol.89. - №1-2. – P. 67– 94.
154. Miller, B.A. Impact of multi-scale predictor selection for modeling soil properties / B.A. Miller, S. Koszinski, M. Wehrhan, M. Sommer // *Geoderma*. – 2015. – Vol. 239–240. P. 97–106.
155. Minasny, B. Digital Mapping of Soil Carbon / B. Minasny, A.B. McBratney, B.P. Malone, I. Wheeler // *Advances in Agronomy*. – 2013. – Vol.118. – P. 1-47.
156. Minasny, B. Digital soil mapping: A brief history and some lessons / B. Minasny, A.B. McBratney // *Geoderma*, - 2016. - Vol.264. - Part B. – P. 301-311.
157. Moore, I.D. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications / I.D. Moore, R.B. Grayson, A.R. Ladson // *Hydrological Processes*. – 1991. - Vol.5. - №1. – P. 3-30.
158. Moore, I.D. Soil attribute prediction using terrain analysis / I.D. Moore, P.E. Gessler, G.A. Nielsen, G.A. Peterson / *Soil Science Society of America Journal*. – 1993. - Vol.57. – P. 443–452.
159. Montrone, S. Statistical Methods for Spatial Planning and Monitoring / S. Montrone, P. Perchinunno. - Springer-Verlag, 2013. - 167 p.
160. Mulder, V.L. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review / V.L. Mulder, S. de Bruin, M.E. Schaepman, T.R. Mayr // *Geoderma*. – 2011. - Vol.162. – P. 1–19.

161. Odeh, I. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging / I. Odeh, A.B. McBratney, D.J.Chittleborough // *Geoderma*. – 1995. - Vol.67. – P. 215–226.
162. Odgers, N.P. Bottom-up digital soil mapping. II. Soil series classes / N.P. Odgers, A.B. McBratney, B. Minasny // *Geoderma*. – 2011. - Vol.163. – P.30–37.
163. Olaya, V. Basic Land-Surface Parameters / V. Olaya // *Geomorphometry: concepts, software, applications. Developments in Soil Science*. – Amsterdam: Elsevier, 2008. - Vol.33. - P.141-169.
164. Oliveira, de J.C.Jr. Terrain attributes and spatial distribution of soil mineralogical attributes / J.C.Jr. de Oliveira, V.F. de Melo, L.C.P. de Souza, H.O. da Rocha // *Geoderma*. – 2014. - Vol.213. – P. 214–225.
165. Oliver, M.A. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging / M.A. Oliver, R. Webster // *Catena*. – 2014. - Vol.113. - 56–69.
166. Parkin, T.B. Spatial variability of microbial processes in soil / T.B. Parkin // *A review. J. of Environ. Qual.* – 1993. – Vol. 22. – P. 409–417.
167. Pebesma, E.J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package / E.J. Pebesma // *Computers & Geosciences*. - 2004. – Vol.30. - P. 683-691.
168. Pebesma, E.J. The Role of External Variables and GIS Databases in Geostatistical Analysis / E.J. Pebesma // *Transactions in GIS*. – 2006. - Vol.10. - №4. - P. 615–632.
169. Pei, T. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods / T. Pei, C.-Z. Qin, A-X. Zhu, L. Yang, M. Luo, B. Li, C. Zhou // *Ecological Indicators*. – 2010. - Vol.10. – P.610–619.
170. Piccini, C. Estimation of soil organic matter by geostatistical methods: Use of auxiliary information in agricultural and environmental assessment / C.

Piccini, A. Marchetti, R. Francaviglia // *Ecological Indicators*. – 2014. - Vol.36. – P. 301–314.

171. Plant, R.E. *Spatial data analysis in Ecology and Agriculture using R* / R.E. Plant. - Boca Raton: CRC Press, 2012. – 618 p.

172. QGIS. A Free and Open Source Geographic Information System [Электронный ресурс] // QGIS Development Team. – Режим доступа: <https://qgis.org/ru/site/> (дата обращения: 16.11.2021).

173. Qian, S.S. *Environmental and ecological statistics with R* / S.S. Qian. - CRC Press, 2010. - 434 p.

174. Qi-yong, Y. Prediction of soil organic matter in peak-cluster depression region using kriging and terrain indices / Y. Qi-Yong, J. Zhong-Cheng, L. Wen-Jun, L. Hui // *Soil & Tillage Research*. – 2014. - Vol.144. – P. 126–132.

175. Rabus, B. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar / B. Rabus, M. Eineder, A. Roth, R. Bamler // *SPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. – 2003. – Vol.57. – P. 241–262.

176. Reu, J.D. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes / J.D. Reu, J. Bourgeois, M. Bats, A. Zwertvaegher, V. Gelorini, P.D. Smedt, W. Chu, M. Antrop, P.D. Maeyer, P. Finke, M.V. Meirvenne, J. Verniers, P. Crombé // *Geomorphology*. – 2013. - Vol.186. – P. 39–49.

177. Riley, S.J. A Terrain Ruggedness that Quantifies Topographic Heterogeneity / S.J. Riley, S.D. de Gloria, R. Elliot // *Intermountain Journal of Science*. - 1999. - Vol.5. - №.1-4. – P. 23-27.

178. Robinson, T.P. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties / T.P. Robinson, G. Metternicht // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2006. - Vol.50. – P. 97–108.

179. Rodríguez-Lado, L. Modelling and mapping organic carbon content of topsoils in an Atlantic area of southwestern Europe (Galicia, NW-Spain) / L.

Rodríguez-Lado, A. Martínez-Cortizas // *Geoderma*. – 2015. - Vol.245–246. – P. 65–73.

180. Ryazanov S.S., Comparison of terrain-based drift models to improve the quality of soil predictive mapping at a field scale // S.S. Ryazanov, Sahabiev I.A. // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. - 2016. - №4(36). - С. 21-33.

181. Sahabiev I.A., Digital soil mapping as a basis for climatically oriented agriculture a thematic on the territory of the national crop testing fields of the Republic of Tatarstan, Russia / I.A. Sahabiev, K.G. Giniyatullin, S.S. Ryazanov // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. - 2018. - Vol.107. – P. 1-8.

182. Samuel-Rosa, A. Do more detailed environmental covariates deliver more accurate soil maps? / A. Samuel-Rosa, G.B.M. Heuvelink, G.M. Vasques, L.H.C. Anjos // *Geoderma*. – 2015. - Vol.243–244. – P. 214–227.

183. Scull, P. The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape / P. Scull, J. Franklin, O.A. Chadwick // *Ecological Modelling*. – 2005. - Vol. 181. – P. 1–15.

184. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects . (дата обращения: 16.11.2021).

185. Sun, X.-L. Sensitivity of digital soil maps based on FCM to the fuzzy exponent and the number of clusters / X.-L. Sun, Y.-G. Zhao, H.-L. Wang, L. Yang, C.-Z. Qin, A.-X. Zhu, G.-L. Zhang, T. Pei, B.-L. Li // *Geoderma*. – 2012. - Vol.171-172. - P. 24–34.

186. The R Project for Statistical Computing [Электронный ресурс] // R Core Team. – Режим доступа: <http://www.R-project.org/> (дата обращения: 16.11.2021).

187. Tobler, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region / W. Tobler // *Economic Geography*. – 1970. - Vol.46. - №2. – P. 234-240.

188. Vermeulen, D. Machine learning performance for predicting soil salinity using different combinations of geomorphometric covariates / D. Vermeulen, A. Van Niekerk // *Geoderma*. – 2017. - Vol.299. – P. 1–12.
189. Webster, R. *Geostatistics for Environmental Scientist* / R. Webster, M.A. Oliver. - John Wiley & Sons. Ltd, 2007. - 318 p.
190. Webster, R. Is soil variation random? / R. Webster // *Geoderma*. - 2000. - Vol.97. - P.149–163.
191. Webster, R. Sample adequately to estimate variograms of soil properties / R. Webster, M.A. Oliver // *J. Soil. Sci.* - 1992. - Vol.43. - P. 177–192.
192. Wilson, J.P. *Terrain Analysis: Principles and Applications* / J.P. Wilson, J.C. Gallant. - New York: Wiley, 2000. - 446 p.
193. Zhang, G.-L. Digital Soil Mapping Across Paradigms, Scales, and Boundaries: A Review / G.-L. Zhang, L. Feng, X.-D. Song, Y.-G. Zhao // *Digital Soil Mapping Across Paradigms, Scales and Boundaries*. – Singapore: Springer Science+Business Media, 2016. - P. 3-10.
194. Zhang, S. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information / S. Zhang, Y. Huang, C. Shen, H. Ye, Y. Du // *Geoderma*. – 2012. - Vol. 171-172. – P. 35–43.
195. Zhu, A.X. Construction of membership functions for predictive soil mapping under fuzzy logic / A.X. Zhu, L. Yang, B.L. Li, C.Z. Qin, T. Pei, B. Liu // *Geoderma*. – 2010a. - Vol. 155. - P. 164–174.
196. Zhu, Q. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes / Q. Zhu, H.S. Lin // *Pedosphere*. – 2010b. - Vol.20. – №5. - P. 594–606.

Приложение А

Карты полей с наложенными контурами почв.

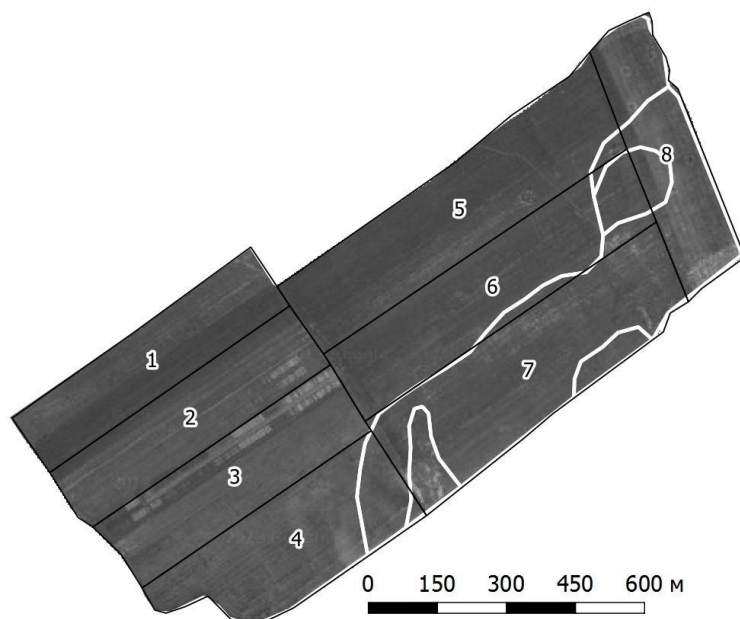


Рисунок А.1. Почвы и разделение по полям в Зайинском ГСУ.

Нумерацией отмечены номера полей.

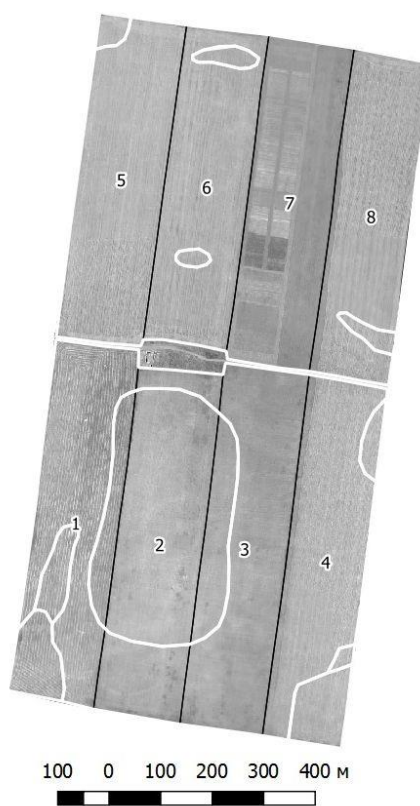


Рисунок А.2. Почвы и разделение по полям в Арском ГСУ. Нумерацией отмечены номера полей.

Приложение Б

Таблица Б.1

Описательные статистические данные почвенных свойств по полям Заинского ГСУ

	Min								Max							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Гумус, %	7,7	7,3	7,1	6,2	7,1	5,9	5,4	4,0	7,9	7,9	7,8	7,9	8,1	6,9	7,3	6,8
Азот гидр. мг/кг	179	173	203	168	199	196	159	157	224	247	225	246	238	273	238	229
Фосфор подв., мг/кг	277	222	214	162	278	182	111	166	595	299	320	211	368	244	228	274
Калий подв., мг/кг	157	146	160	136	207	158	143	138	276	182	189	189	229	186	205	191
Кислотность	6,1	6,1	6,1	6,1	6,0	6,1	6,0	6,1	6,5	6,3	6,4	6,5	6,2	6,3	7,4	7,8
Физ. глина, %	53	53	52	49	52	49	38	35	56	55	55	58	54	55	54	53
	$\bar{x} \pm m$								Med							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Гумус, %	7,8 ±0,03	7,6 ±0,10	7,4 ±0,15	7,1 ±0,29	7,6 ±0,13	6,5 ±0,19	6,4 ±0,11	5,5 ±0,39	7,8	7,7	7,3	7,0	7,3	6,6	6,4	5,5
Азот гидр. мг/кг	206 ±6,45	213 ±10,57	218 ±4,11	210 ±13,11	213 ±6,82	225 ±11,82	198 ±5,03	176 ±11,43	210	214	224	221	207	222	196	166
Фосфор подв., мг/кг	357 ±48,94	268 ±12,24	252 ±14,99	186 ±7,65	332 ±16,63	216 ±9,29	187 ±6,88	218 ±21,76	318	271	248	187	346	213	190	218
Калий подв., мг/кг	193 ±17,77	170 ±5,44	176 ±3,81	160 ±7,73	215 ±3,32	173 ±4,29	169 ±3,87	167 ±8,65	182	173	177	156	214	175	165	174
Кислотность	6,3 ±0,07	6,2 ±0,03	6,3 ±0,05	6,3 ±0,06	6,1 ±0,04	6,2 ±0,04	6,5 ±0,12	7,3 ±0,26	6,2	6,2	6,3	6,3	6,1	6,2	6,3	7,4
Физ. глина, %	54 ±0,47	54 ±0,39	54 ±0,53	54 ±1,70	53 ±0,23	53 ±0,93	47 ±1,27	44 ±2,47	54	54	5	55	53	53	49	43
	s								V							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	3	5	10	4	7	7	18
Гумус, %	0,08	0,25	0,36	0,71	0,32	0,45	0,47	0,95	1	3	5	10	4	7	7	18
Азот гидр. мг/кг	15,82	25,93	10,07	32,13	16,71	28,96	21,37	27,99	8	12	5	15	8	13	11	16
Фосфор подв., мг/кг	119,87	29,99	36,71	18,74	40,74	22,76	29,19	53,31	33	11	15	10	12	11	16	24
Калий подв., мг/кг	43,52	13,31	9,32	18,94	8,13	10,53	16,40	21,18	23	8	5	12	4	6	10	13
Кислотность	0,18	0,07	0,12	0,13	0,09	0,10	0,49	0,64	3	1	2	2	1	2	8	9
Физ. глина, %	1,16	0,94	1,30	4,18	0,57	2,27	5,39	6,04	2	2	2	8	1	4	11	14

Примечание. Min - минимальное значение, Max - максимальное значение, $\bar{x}$ - среднее значение, m - ошибка среднего значения, Med – медиана, s - стандартное отклонение, V - коэффициент вариации. Цифры 1-8 обозначают поля. Количество наблюдений (n) для полей: n (1-6,8) = 6, n (7) = 18

Таблица Б.2

Описательные статистические данные почвенных свойств по классам почв Заинского ГСУ

	Min				Max				$\bar{x} \pm m$				Med			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Гумус, %	5,1	4,0	5,8	5,8	8,1	7,3	6,8	6,7	7,3 $\pm 0,11$	6,2 $\pm 0,18$	6,4 $\pm 0,24$	6,2 $\pm 0,43$	7,4	6,3	6,5	6,2
Азот гидр. мг/кг	158	157	173	159	273	238	241	179	212 $\pm 3,90$	200 $\pm 5,84$	196 $\pm 15,07$	169 $\pm 9,90$	214	201	186	169
Фосфор подв., мг/кг	162	159	137	111	595	274	267	181	269 $\pm 13,40$	195, $\pm 6,32$	212 $\pm 27,02$	141 $\pm 35,07$	254	199	185	146
Калий подв., мг/кг	136	143	143	163	276	205	182	178	180 $\pm 4,6$ 4	171 $\pm 3,75$	163 $\pm 9,11$	170 $\pm 7,23$	177	172	164	177
Кислотность	6,0	6,0	6,3	7,1	7,6	7,7	7,8	7,4	6,3 $\pm 0,04$	6,5 $\pm 0,13$	6,9 $\pm 0,31$	7,2 $\pm 0,12$	6,2	6,3	6,8	7,2
Физ. глина, %	48	35	39	39	58	54	55	48	54 $\pm 0,35$	47 $\pm 1,35$	45 $\pm 3,3$ 2	44 $\pm 4,47$	54	49	44	44
	s				V											
	1	2	3	4	1	2	3	4								
Гумус, %	0,68	0,78	0,47	0,61	9	13	7	10								
Азот гидр. мг/кг	23,41	24,78	30,13	14,00	11	12	15	8								
Фосфор подв., мг/кг	80,37	26,83	54,05	49,59	30	13	30	34								
Калий подв., мг/кг	27,84	15,90	18,22	10,27	15	9	11	6								
Кислотность	0,25	0,56	0,63	0,17	4	9	9	2								
Физ. глина, %	2,07	5,74	6,64	6,91	4	12	15	14								

Примечание. Min - минимальное значение, Max - максимальное значение, $\bar{x}$ - среднее значение, m - ошибка среднего значения, Med – медиана, s - стандартное отклонение, V - коэффициент вариации. Цифры 1-4 обозначают классы почв. Количество наблюдений (n) для классов почв: n (1) = 36, n (2) = 18, n (3) = 4, n (4) = 2

Таблица Б.3

Описательные статистические данные почвенных свойств по полям Арского ГСУ

	Min								Max							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Гумус, %	3,0	2,8	2,8	2,4	2,3	2,9	2,6	2,5	4,3	3,5	3,7	3,6	2,9	3,2	3,1	3,0
Азот гидр. мг/кг	98	94	101	95	84	98	84	78	157	140	150	144	112	115	112	123
Фосфор подв., мг/кг	327	200	148	189	574	727	358	254	781	691	619	517	781	781	619	455
Калий подв., мг/кг	168	160	103	164	247	318	204	168	383	288	328	239	323	426	259	278
Кислотность	6,3	6,4	6,4	6,5	7,6	7,2	6,8	6,6	7,3	7,0	7,0	7,2	7,7	7,5	7,0	7,0
Физ. глина, %	38	37	38	35	40	41	40	39	42	43	44	43	43	44	44	42
	$\bar{x} \pm m$								Med							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Гумус, %	3,5 $\pm 0,17$	3,1 $\pm 0,09$	3,2 $\pm 0,12$	3,2 $\pm 0,15$	2,6 $\pm 0,09$	3,1 $\pm 0,05$	2,9 $\pm 0,09$	2,6 $\pm 0,08$	3,4	3,0	3,1	3,3	2,6	3,1	2,9	2,6
Азот гидр. мг/кг	124 $\pm 8,24$	111 $\pm 5,99$	118 $\pm 7,94$	124 $\pm 6,75$	95 $\pm 4,27$	110 $\pm 2,68$	96 $\pm 4,11$	103 $\pm 6,28$	129	109	109	129	92	112	95	104
Фосфор подв., мг/кг	489 $\pm 55,52$	480 $\pm 61,35$	407 $\pm 65,23$	377 $\pm 48,72$	703 $\pm 31,61$	752 $\pm 10,33$	447 $\pm 36,52$	381 $\pm 28,58$	489	506	483	373	721	749	430	397
Калий подв., мг/кг	258 $\pm 27,46$	224 $\pm 18,99$	215 $\pm 29,97$	203 $\pm 11,82$	286 $\pm 11,60$	385 $\pm 15,67$	226 $\pm 8,37$	218 $\pm 17,24$	241	228	245	208	282	398	224	208
Кислотность	6,7 $\pm 0,16$	6,7 $\pm 0,07$	6,7 $\pm 0,08$	6,9 $\pm 0,11$	7,6 $\pm 0,02$	7,3 $\pm 0,03$	6,9 $\pm 0,04$	6,7 $\pm 0,07$	6,5	6,8	6,8	7,0	7,6	7,3	6,8	6,6
Физ. глина, %	40 $\pm 0,43$	40 $\pm 0,72$	41 $\pm 0,82$	40 $\pm 1,07$	41 $\pm 0,51$	43 $\pm 0,38$	42 $\pm 0,47$	41 $\pm 0,47$	41	40	41	41	41	43	41	42
	s								V							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Гумус, %	0,46	0,26	0,33	0,39	0,22	0,12	0,21	0,19	13	9	10	12	8	4	7	7
Азот гидр. мг/кг	21,80	15,86	21,02	17,86	10,47	6,56	10,06	15,39	16	14	18	14	11	6	10	15
Фосфор подв., мг/кг	146,89	162,33	172,59	128,90	77,44	25,30	89,45	70,01	30	34	42	34	11	3	20	18
Калий подв., мг/кг	72,65	50,26	79,29	31,26	28,42	38,38	20,51	42,24	28	22	37	15	10	10	10	19
Кислотность	0,43	0,19	0,22	0,29	0,05	0,07	0,09	0,17	6	3	3	4	1	1	1	2
Физ. глина, %	1,13	1,91	2,16	2,85	1,25	0,93	1,15	1,16	3	5	5	7	3	2	3	3

Примечание. Min - минимальное значение, Max - максимальное значение, $\bar{x}$ - среднее значение, m - ошибка среднего значения, Med –

медиана, s - стандартное отклонение, V - коэффициент вариации. Цифры 1-8 обозначают поля. Количество наблюдений (n) для полей: n (1-4)

= 7, n (5-8) = 6.

Таблица Б.4

Описательные статистические данные почвенных свойств по типам почв Арского ГСУ

	Min		Max		$\bar{x} \pm m$		Med		s		V	
	Дерн- подзол.	Серая- лесная	Дерн- подзол.	Серая- лесная	Дерн- подзол.	Серая- лесная	Дерн- подзол.	Серая- лесная	Дерн- подзол.	Серая- лесная	Дерн- подзол.	Серая- лесная
Гумус, %	2,6	2,3	3,3	4,3	3,0 $\pm 0,07$	3,1 $\pm 0,06$	2,9	3,0	0,21	0,42	7	14
Азот гидр. мг/кг	94	78	147	157	108 $\pm 5,44$	111 $\pm 2,89$	101	109	16,33	18,97	15	17
Фосфор подв., мг/кг	344	148	654	781	513 $\pm 29,49$	497 $\pm 28,81$	506	455	88,47	188,94	17	38
Калий подв., мг/кг	197	103	288	426	249 $\pm 10,62$	250 $\pm 12,02$	258	239	31,86	78,79	12	32
Кислотность	6,4	6,3	7,6	7,7	6,8 $\pm 0,11$	7,0 $\pm 0,06$	6,8	6,9	0,32	0,40	5	6
Физ. глина, %	38	35	43	44	40 $\pm 0,48$	41 $\pm 0,28$	40	41	1,44	1,87	4	5

Примечание. Min - минимальное значение, Max - максимальное значение, $\bar{x}$ - среднее значение, m - ошибка среднего значения, Med – медиана, s - стандартное отклонение, V - коэффициент вариации. Цифры 1-4 обозначают классы почв. Количество наблюдений (n) для классов почв: n (Дерново-подзолистая) = 9, n (Серая лесная) = 43.

Приложение В

Распределение значений почвенных свойств по полям и почвам ГСУ

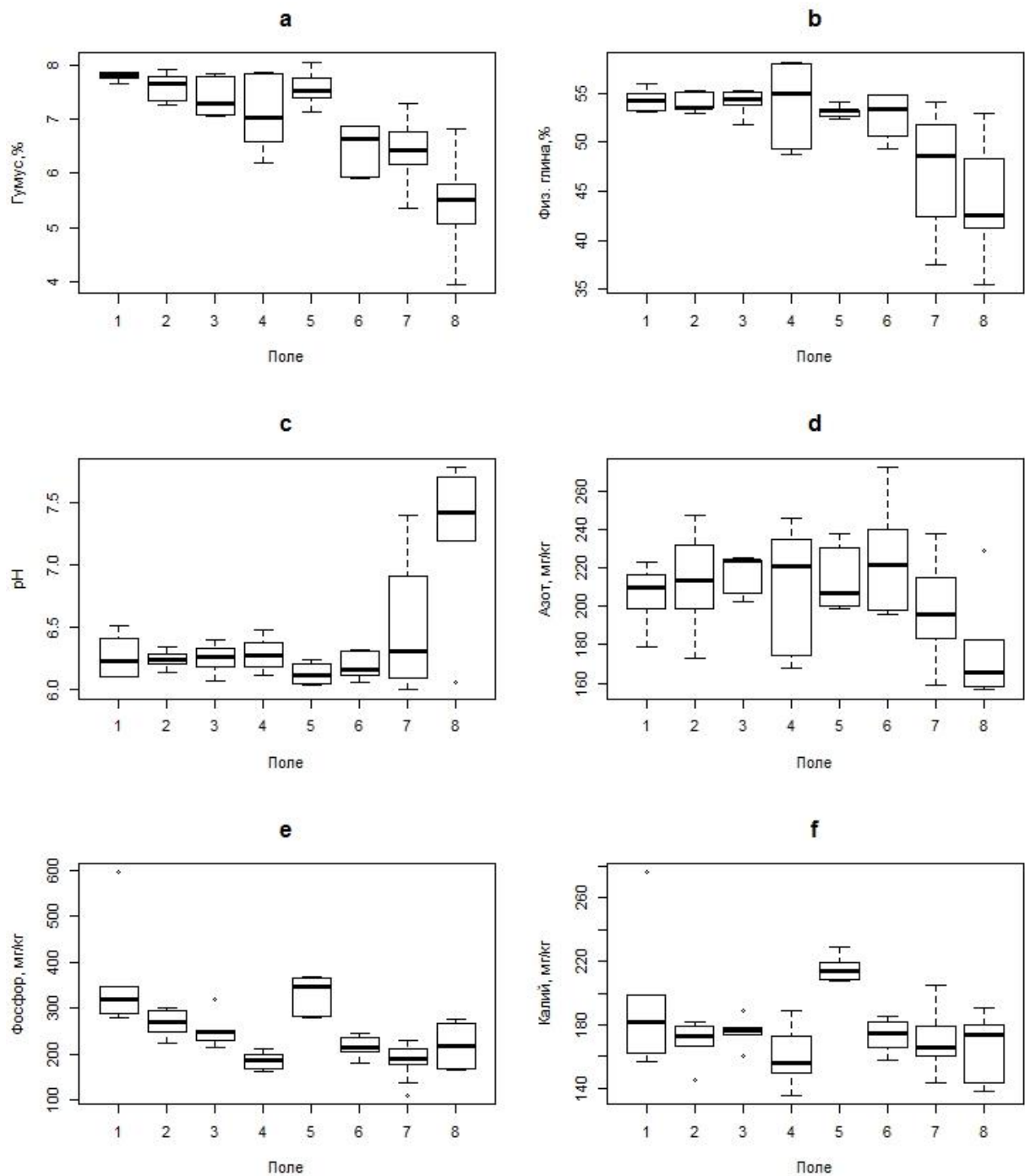


Рисунок В.1. Графики «ящик-с-усами» свойств почв по полям Заинского ГСУ: а) Гумус,%, б) Физическая глина,%, в) pH водной вытяжки д) азот легкогидролизуемых соединений, мг/кг, е) подвижные формы фосфора, мг/кг, ф) подвижные соединения калия, мг/кг. По оси ординат представлены значения переменных, по оси абсцисс - номера полей ГСУ

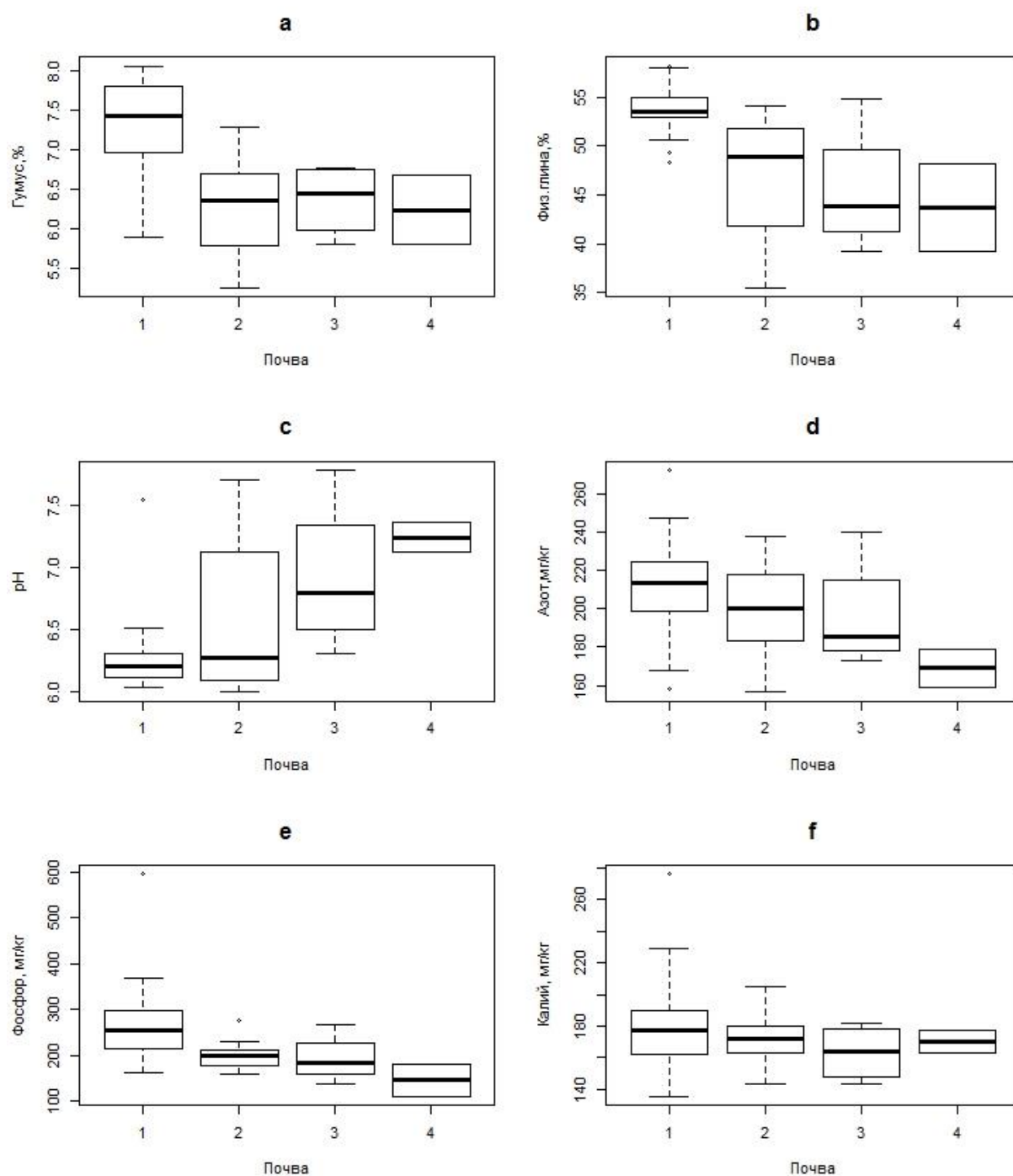


Рисунок В.2. Графики «ящик-с-усами» значений свойств почв по классам почв Заинского ГСУ а) Гумус,%, б) Физическая глина,%, в) pH водной вытяжки д) азот легкогидролизуемых соединений, мг/кг, е) подвижные формы фосфора, мг/кг, ф) подвижные соединения калия, мг/кг. По оси ординат представлены значения переменных, по оси абсцисс - номера почвенных классов. Нумерация классов почв дается согласно Таблице 2.

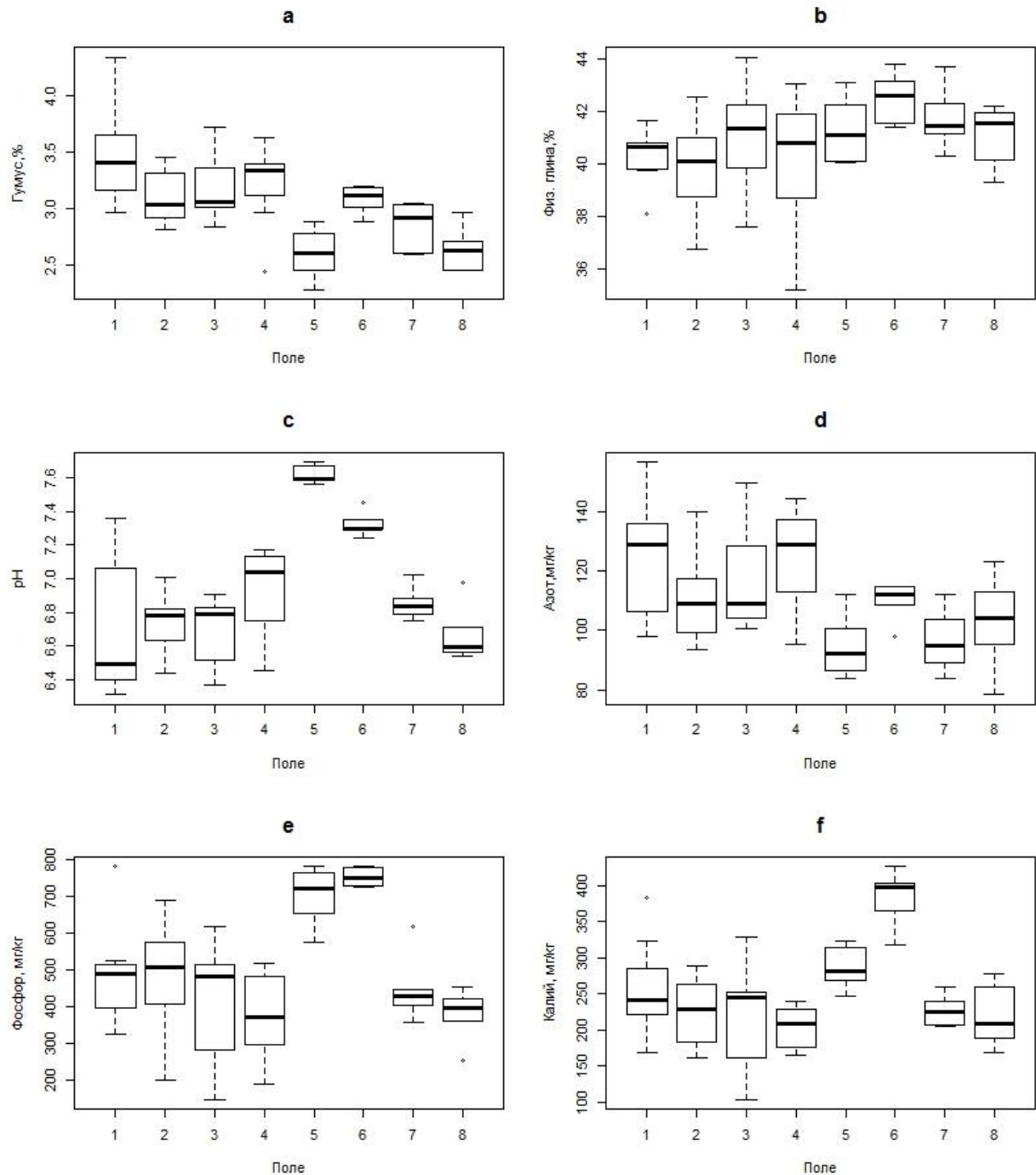


Рисунок В.3. Графики «ящик-с-усами» значений свойств почв по полям Арского ГСУ: а) Гумус,%, б) Физическая глина,%, в) рН водной вытяжки д) азот легкогидролизуемых соединений, мг/кг, е) подвижные формы фосфора, мг/кг, ф) подвижные соединения калия, мг/кг. По оси ординат представлены значения переменных, по оси абсцисс - номера полей ГСУ

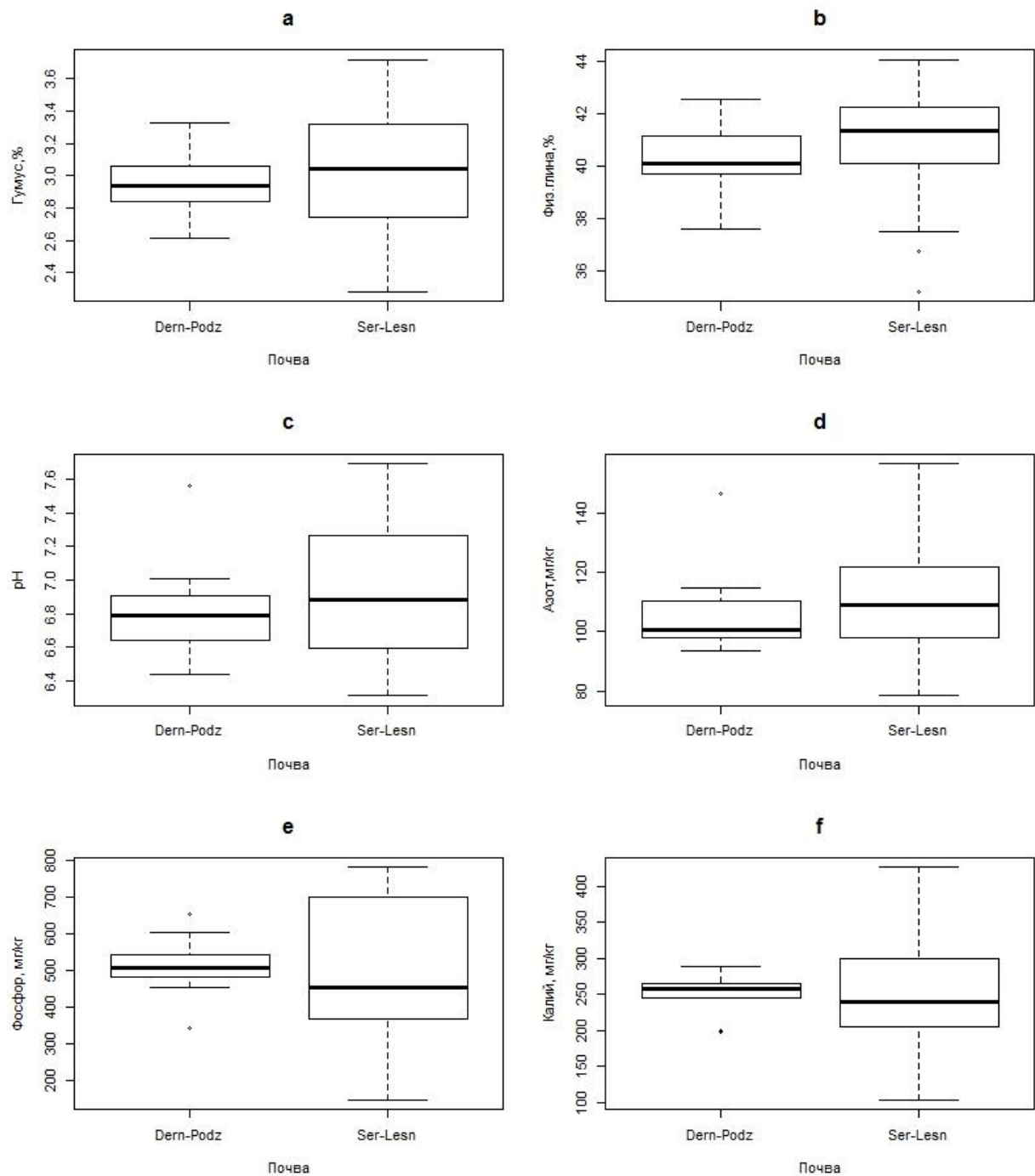


Рисунок В.4. Графики «ящик-с-усами» значений свойств почв по классам почв Арского ГСУ: а) Гумус,%, б) Физическая глина,%, в) pH водной вытяжки д) азот легкогидролизуемых соединений, мг/кг, е) подвижные формы фосфора, мг/кг, ф) подвижные соединения калия, мг/кг. По оси ординат представлены значения переменных, по оси абсцисс – наименование почв (Dern-Podz – дерново-подзолистая, Ser-Lesn – серая лесная).

Приложение Г

Таблица Г.1

Значения коэффициентов корреляции Спирмена между почвенными свойствами и морфометрическими величинами рельефа для Заинского и Арского ГСУ (2011 год)

Полное название	Гумус, %	Азот, мг/кг	Фосфор, мг/кг	Калий, мг/кг	рН	Физ., глина, %	Гумус, %	Азот, мг/кг	Фосфор, мг/кг	Калий, мг/кг	рН	Физ., глина, %
	Заинский ГСУ						Арский ГСУ					
Elevation	0,72***	0,26*	0,67**	0,29*	-0,32*	0,59***	-0,52***	-0,47***	0,44**	0,40**	0,33*	0,42**
Slope	0,43***	0,23	0,04	-0,21	-	0,43***	0,06	0,06	-0,28*	-0,22	-0,30*	-0,15
Aspect	-0,29*	-0,07	-0,50*	-0,29*	-	-0,27*	-0,06	-0,16	0,47**	0,46***	0,38**	0,10
Southwestness	-0,56***	-0,29*	-0,29*	0,05	0,29*	-0,53***	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Profile Curvature	-0,08	-0,03	-0,10	0,08	0,29*	-0,29*	-0,13	-0,09	-0,16	-0,11	0,21	-0,05
Plan Curvature	0,26*	0,15	0,21	0,35**	-0,05	0,24	-0,12	0,22	-0,24	-0,11	-0,07	-0,25
General Curvature	0,2	0,17	0,15	0,35**	0,18	0,08	0,04	0,07	-0,05	0,13	0,13	0,02
Longitudinal Curvature	-0,05	-	-0,06	0,12	0,33	-0,24	0,02	-0,11	-0,07	-	0,20	0,07
Cross-Sectional Curvature	0,32*	0,23	0,22	0,38**	0,02	0,31	0,12	-0,17	-0,07	-0,05	-0,07	0,17
Maximum Curvature	0,22	0,02	0,23	0,49**	0,29*	0,02	0,04	-0,16	0,13	0,05	0,19	0,16
Minimum Curvature	0,06	0,22	-0,05	0,05	0,07	0,06	-0,07	-0,11	-0,22	-0,21	0,07	0,04
Tangential Curvature	0,32*	0,19	0,21	0,36**	-0,02	0,36**	0,07	0,05	0,06	0,27	0,13	0,05
Stream Power Index	0,06	-0,02	-0,21	-0,35**	0,08	-	-0,02	0,18	-0,29*	-0,30*	-0,13	-0,17
Wetness Index	-0,67***	-0,27*	-0,46***	0,04	0,15	-0,62***	NA	NA	NA	NA	NA	NA
SAGA Wetness Index	-0,50***	-0,28*	-0,33*	-0,19	0,11	-0,41**	-0,12	0,05	0,03	-	0,11	-
Catchment area	-0,20	-0,11	-0,26*	-0,30*	0,07	-0,14	-0,1	0,15	-0,18	-0,17	-0,05	-0,12
Flow Accumulation	0,41**	0,18	0,08	-0,22	-0,08	0,44**	-0,07	0,11	-0,07	-0,14	-0,19	-0,18

Продолжение таблицы Г.1

Sediment Transport Index	0,19	0,09	-0,10	-0,32*	0,07	0,24	0,13	0,07	-0,25	-0,21	-0,23	-0,18
Topographic Position Index	0,18	0,15	0,14	0,35*	0,24	0,03	0,04	-	-0,07	0,07	0,10	0,03
Terrain Ruggedness Index	0,43***	0,23	0,05	-0,21	-	0,44***	0,10	0,08	-0,35*	-0,30*	-0,24	-0,14
Convergence Index	0,20	-	0,33*	0,31*	-0,09	0,12	0,16	-0,20	0,06	0,07	-0,02	0,22
Terrain Surface Convexity	-0,06	-0,18	0,09	0,04	-0,01	-0,21	0,19	0,18	-0,15	-0,14	-0,25	-0,08
Classification Index for Lowlands	-0,74***	-0,28*	-0,64***	-0,30*	0,28*	-0,61***	0,44**	0,42**	-0,23	-0,23	-0,23	-0,41**
Terrain Surface Texture	-0,33**	-0,16	0,01	0,23	-0,08	-0,25	0,21	-0,02	0,17	0,15	-0,25	-0,12
Multi-Resolution Valley Bottom Flatness Index	-0,68***	-0,28*	-0,34**	0,07	0,07	-0,48***	0,55***	0,33*	-0,31*	-0,32*	-0,39**	-0,32*
Multi-Resolution Ridge-Top Flatness Index	0,37**	0,11	0,68***	0,38**	-0,28*	0,26*	-0,55***	-0,49***	0,42**	0,39**	0,31*	0,38**
Vertical Distance to Channel Network	-0,71***	-0,26*	-0,70***	-0,31*	0,34**	-0,54***	-0,48***	-0,47***	0,19	0,21	0,20	0,41**
Slope Length (LS) Factor	0,31*	0,15	-0,04	-0,28*	0,04	0,34**	0,05	0,10	-0,28*	-0,27	-0,27*	-0,18
Valley Depth	-0,18	0,04	-0,48***	-0,11	0,14	-0,05	0,20	0,26	-0,35*	-0,34*	-0,22	-0,26
Slope Height	0,58***	0,20	0,62***	0,21	-0,20	0,38**	-0,07	0,07	-0,43**	-0,42**	-0,37**	-0,10
Mid-Slope Positon	0,64***	0,21	0,62***	0,32*	-0,10	0,51***	0,07	0,18	-0,42**	-0,45**	-0,44**	-0,19

Примечание: Звездочками отмечены уровни значимости (*** - $\alpha = 0,001$, ** - $\alpha = 0,01$, * - $\alpha = 0,05$). Прочерком отмечены очень низкие значения коэффициента корреляции, NA – нет данных.

Таблица Г.2

Значения коэффициентов корреляции Спирмена между почвенными свойствами и морфометрическими величинами рельефа для Заинского и Арского ГСУ (1987 год)

Полное название	Гумус, %	Азот лг. мг/кг	Фосфор подв., мг/кг	Калий подв., мг/кг	рН сол	Гумус, %	Азот лг. мг/кг	Фосфор подв., мг/кг	Калий подв., мг/кг	рН
	Заинский ГСУ					Арский ГСУ				
Elevation	0,40**	0,33*	0,26*	0,49***	-0,28	-0,11	-0,65***	0,38**	0,36**	-0,08
Slope	0,19	0,28*	-	0,14	-	-0,09	0,10	-0,39**	-0,08	-
Aspect	-0,40**	-0,10	-0,54**	-0,16	-	0,07	-0,10	-0,04	0,40**	-
Profile Curvature	-0,24	-0,36**	-0,20	-0,25	0,20	-0,19	-0,11	-0,14	-0,28*	-0,39**
Plan Curvature	-	-0,16	-	0,15	-0,10	-0,25	0,15	-0,38**	-0,32*	-0,35*
General Curvature	-0,06	-0,36**	-0,12	-	0,11	0,10	-0,13	0,11	0,12	0,02
Longitudinal Curvature	-0,19	-0,36*	-0,17	-0,23	0,19	0,05	-0,10	0,06	-0,14	-0,15
Cross-Sectional Curvature	0,08	-0,21	-0,05	0,15	-	0,06	-0,31*	0,23	0,22	0,14
Maximum Curvature	-	-0,22	-	-	0,22	-0,21	-0,04	-0,16	-0,18	-0,28*
Minimum Curvature	-0,12	-0,38**	-0,24	0,08	-	0,23	-0,23	0,32*	0,12	0,10
Tangential Curvature	0,14	-0,17	-	0,17	-	-	-	0,12	0,24	0,13
Stream Power Index	-0,09	0,23	-0,17	-	-	-0,33*	0,28*	-0,47***	-0,40**	-0,33**
Wetness Index	-0,44***	-0,49***	-0,28*	-0,40**	0,27*	NA	NA	NA	NA	NA
SAGA Wetness Index	0,29*	-	-0,18	-0,23	-	-0,19	0,11	-0,19	-0,31*	-0,21
Catchment area	-0,17	0,20	-0,15	-0,11	-0,05	-0,36**	0,23	-0,38**	-0,39**	-0,33*
Flow Accumulation	0,26*	0,42***	0,08	0,21	0,09	0,12	0,10	-0,11	-0,17	-0,13

Продолжение таблицы Г.2

Sediment Transport Index	0,06	0,28*	-0,10	0,05	-	0,07	0,10	-0,25	-0,14	-0,05
Topographic Position Index	-0,05	-0,38**	-0,08	-	0,15	0,08	-0,16	0,10	0,13	-
Terrain Ruggedness Index	0,19	0,28*	-	0,14	-	-0,16	0,12	-0,39**	-0,15	-0,12
Convergence Index	0,23	-0,16	0,21	0,13	-	0,10	-0,30*	0,24	0,22	0,14
Terrain Surface Convexity	-0,13	-0,29*	-0,08	-0,21	0,10	0,17	0,24	-	0,08	0,35*
Classification Index for Lowlands	-0,42***	-0,28*	-0,29*	-0,47***	0,22	0,07	0,60*	-0,25	-0,41**	0,03
Terrain Surface Texture	-	-0,41**	0,07	-	0,12	0,25	0,10	0,28*	0,08	0,28*
Multi-Resolution Valley Bottom Flatness Index	-0,25*	-0,41**	-0,08	-0,30*	0,24	0,34*	0,60***	-0,10	-0,16	0,34*
Multi-Resolution Ridge-Top Flatness Index	0,31*	0,20	0,43***	0,46***	0,04	-0,07	-0,61	0,38**	0,37**	-0,08
Vertical Distance to Channel Network	-0,38**	-0,32*	-0,29*	-0,51***	0,28*	-0,10	-0,58***	0,22	0,34*	-0,08
Slope Length (LS) Factor	0,13	0,31*	-	0,10	-	-0,06	0,16	-0,39**	-0,07	-0,10
Valley Depth	-0,30*	-0,05	-0,46***	-0,35**	0,03	-	0,47***	-0,37**	-0,36**	-0,08
Slope Height	0,28*	0,16	0,20	0,38**	-0,25	-0,14	0,11	0,05	-0,36**	-
Mid-Slope Positon	0,54***	0,22	0,42***	0,30*	-0,12	-	0,18	0,13	-0,40**	0,04

Примечание: Звездочками отмечены уровни значимости (*** - $\alpha = 0,001$, ** - $\alpha = 0,01$, * - $\alpha = 0,05$). Прочерком отмечены очень низкие значения коэффициента корреляции, NA – нет данных.

Приложение Д

Индексы оценки результатов кластеризации

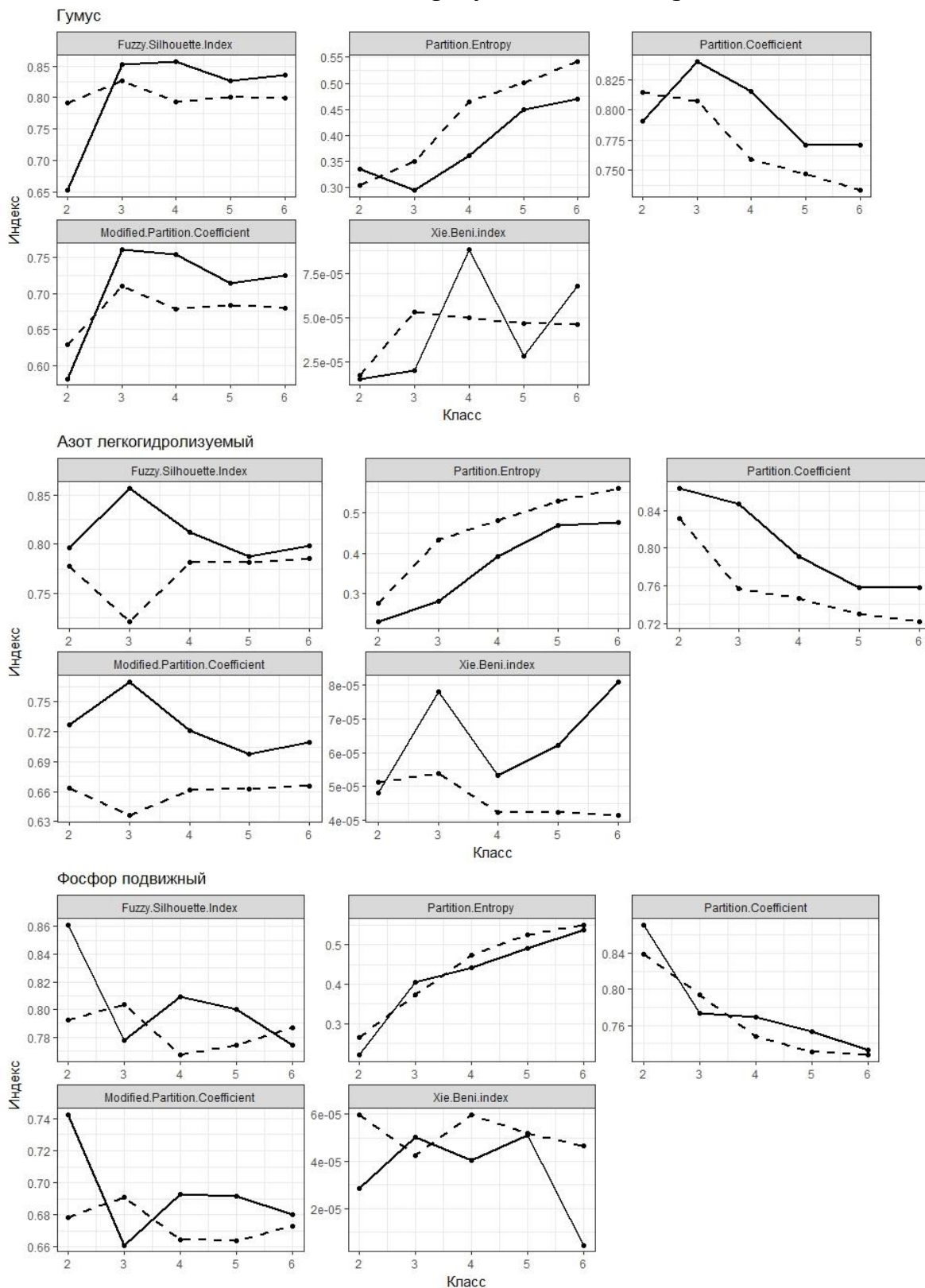


Рисунок Д.1. Распределение индексов кластеризации по числу классов для гумуса, гидролизуемого азота, подвижного фосфора Заинского ГСУ. (Сплошная линия – данные 2011 года, штрихованная линия - данные обследования 1987 года)

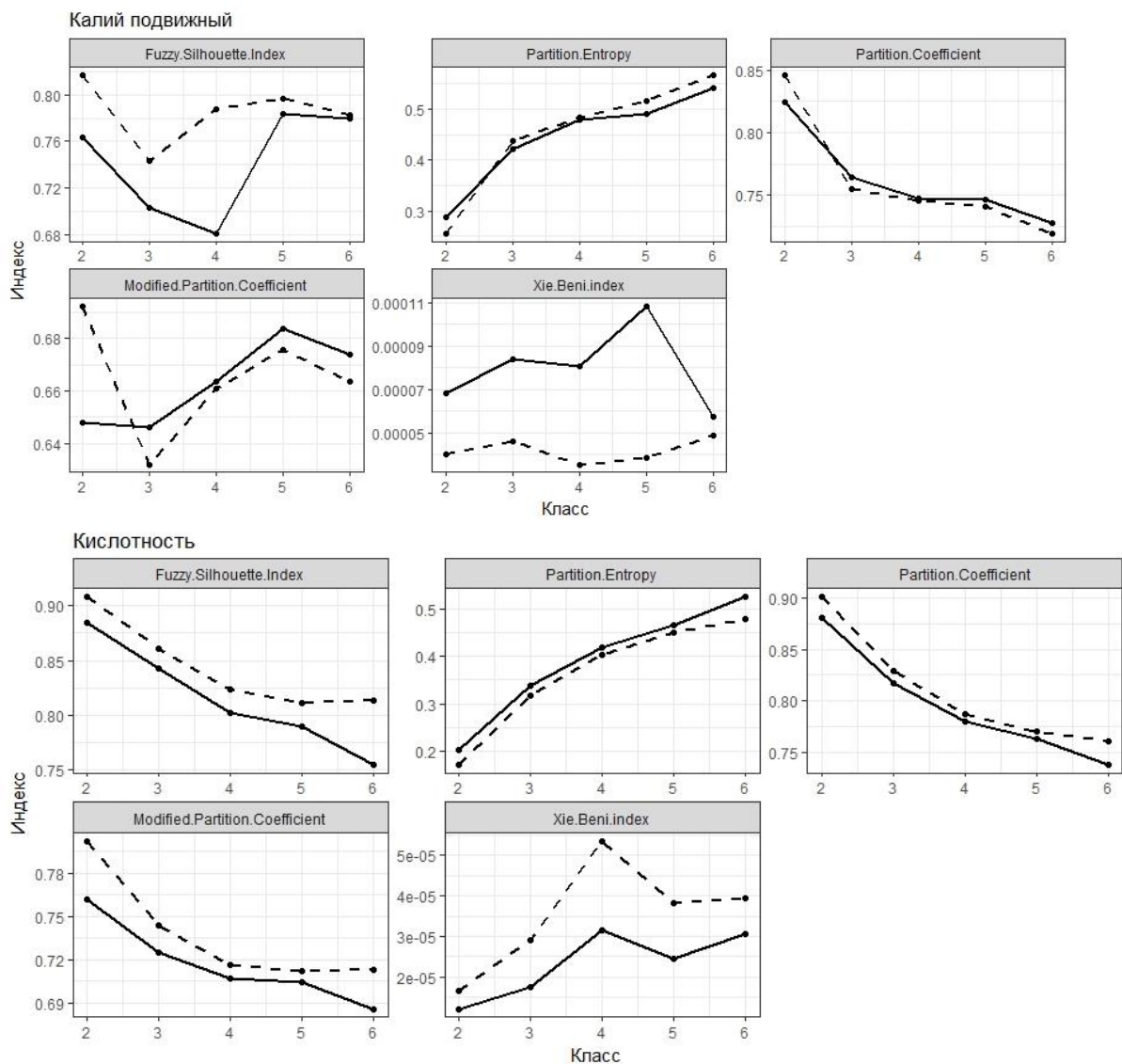


Рисунок Д.2. Распределение индексов кластеризации по числу классов для подвижного калия и кислотности Заинского ГСУ. (Сплошная линия – данные 2011 года, штрихованная линия - данные обследования 1987 года)

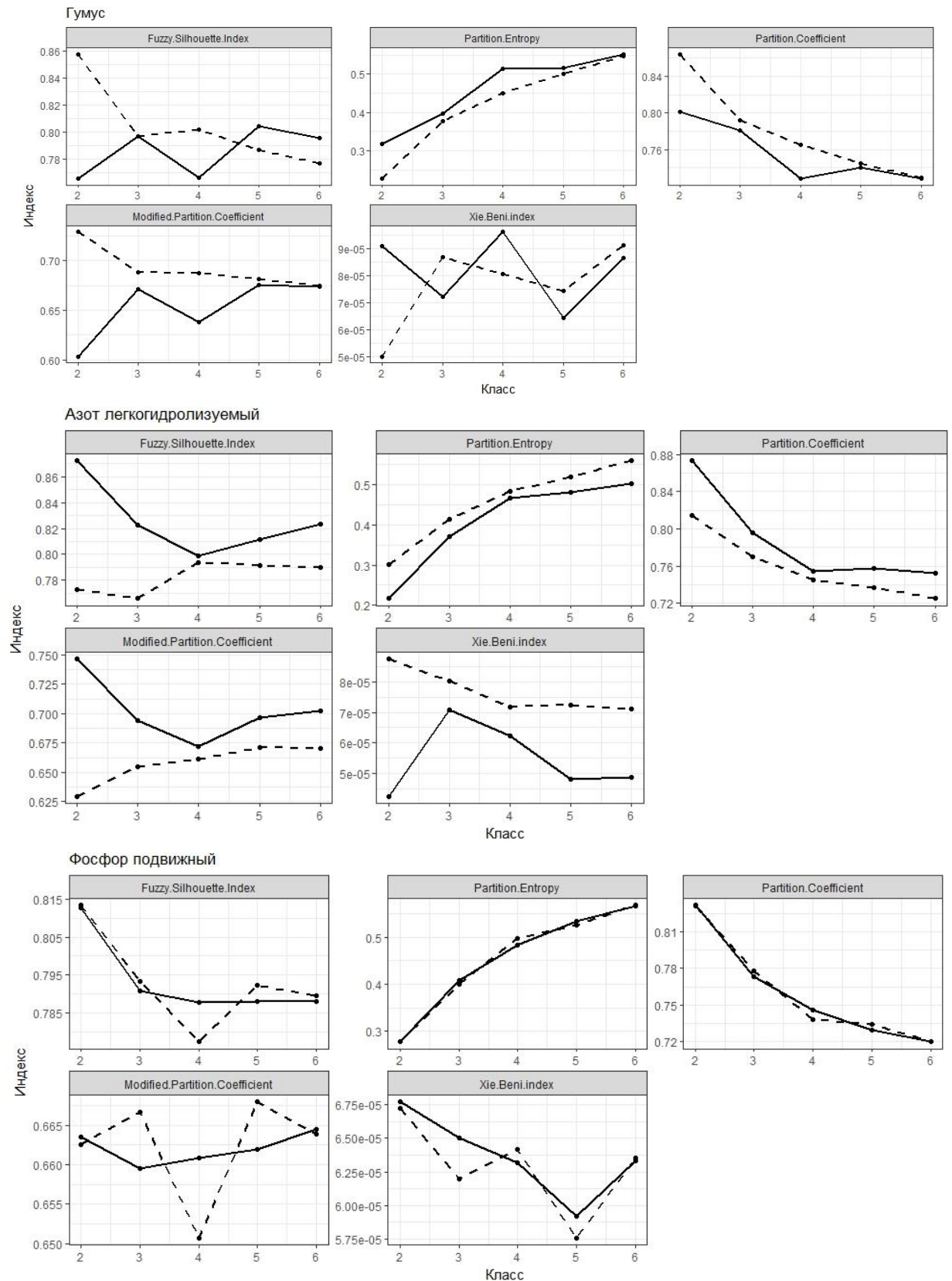


Рисунок Д.3. Распределение индексов кластеризации по числу классов для гумуса, гидролизуемого азота и подвижного фосфора Арского ГСУ. (Сплошная линия – данные 2011 года, штрихованная линия - данные обследования 1987 года)

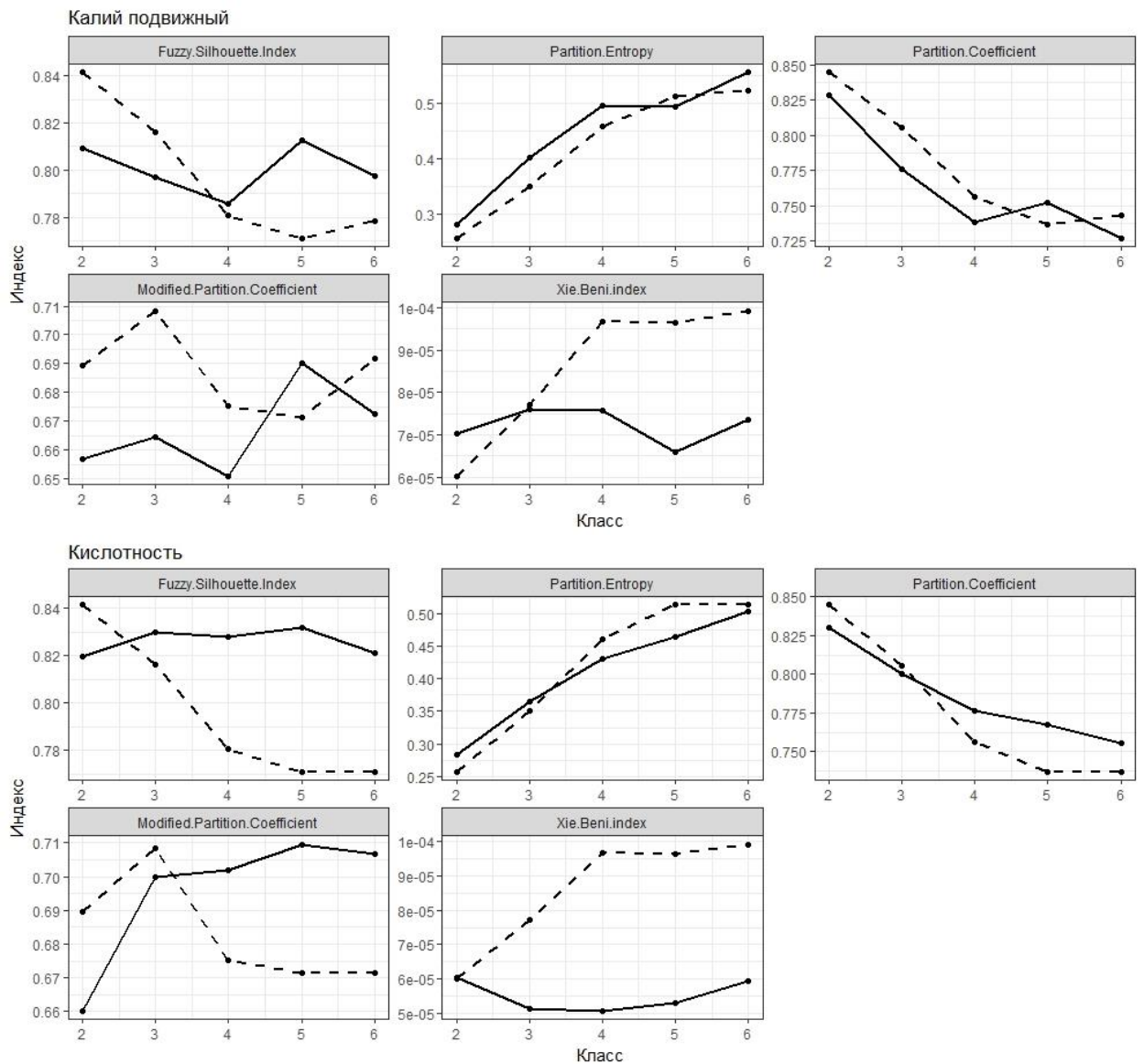


Рисунок Д.4. Распределение индексов кластеризации по числу классов для подвижного калия и кислотности Арского ГСУ. (Сплошная линия – данные 2011 года, штрихованная линии - данные обследования 1987 года)