

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва– 2022

Работа выполнена на кафедре почвоведения Института экологии и природопользования Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет".

Научный руководитель: ***Гиниятуллин Камиль Гашикович***

кандидат биологических наук, доцент, кафедра почвоведения, Институт экологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Официальные оппоненты: ***Самсонова Вера Петровна***

доктор биологических наук, доцент, кафедра общего земледелия и агроэкологии, факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова

Васенев Иван Иванович

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Сидорова Валерия Александровна

кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, лаборатория экологии и географии почв, Институт биологии Карельского научного центра РАН

Защита диссертации состоится «31» мая 2022 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.3(МГУ.03.05) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП–1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, аудитория М-2. E-mail: tparamonova@soil.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/419968051/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат биологических наук

Парамонова Т.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Получение достоверных знаний о состоянии почвенного покрова является актуальной задачей рационального природопользования. Внедрение технологий цифрового земледелия позволяет точнее оценивать содержание элементов питания на агропроизводственных участках, повышать качество урожая, минимизировать затраты на внесение удобрений и, как следствие, способствовать устойчивому развитию сельскохозяйственных территорий. Достичь высокого уровня производства качественной сельскохозяйственной продукции возможно лишь при использовании карт почв и почвенных свойств, обладающих высокой точностью. При этом картографирование на уровне полей является редким явлением (Савин, 2016).

Западное Предкамье и Восточное Закамье – это две важнейшие природно-экономические зоны Республики Татарстан с контрастно отличающимся почвенным покровом. Почвенный покров первого района характеризуется распространением дерново-подзолистых и серых лесных почв, во втором районе преобладают выщелоченные и типичные черноземы. Государственные сортоиспытательные участки (ГСУ) представляют собой оптимальный 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.

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 возрасть.

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) свойства почв на 23 – 54 % определяются рельефом, а на участке с меньшим перепадом высот (Арский ГСУ) – на 13 – 40%.

Практическая значимость работы

Результаты исследования могут быть использованы в качестве методического основания для описания пространственной неоднородности свойств почв на территориях сельскохозяйственного назначения в масштабе поля. Также результаты могут быть использованы как в целях точного земледелия, так и в качестве основы климатически оптимизированных технологий в сельском хозяйстве.

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 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 современных методов статистического анализа и статистического моделирования, оценки точности построенных моделей.

Результаты исследования 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, индексированные 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 при выполнении диссертационной работы, сотрудникам кафедры почвоведения Казанского федерального университета (КФУ) за 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 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Цифровое картографирование почвенных пространственных данных

Суть цифрового прогнозного почвенного картографирования заключается в прогнозе почвенных таксономических единиц и свойств почв на основе пространственно распределенных количественных характеристик факторов почвообразования (Флоринский, 2012; Шеин и др., 2016). Большинство работ в области цифрового картографирования почв основаны на создании численной модели, которая связывает полевые наблюдения почв и факторы почвообразования (Grunwald, 2009; Li, 2010; Zhang et al., 2012; Evans et al., 2014; Bishop et al., 2015; Minasny et al., 2016).

Наиболее известным теоретическим основанием для прогнозного почвенного картографирования служит модель SCORPAN, которая была предложена McBratney et al. (2003) и развивает идеи Докучаева-Захарова-Йенни. Суть модели состоит в том, что почвенные свойства и классификационная принадлежность почв рассматриваются как функция от факторов почвообразования и/или индикаторов. В дополнение к более конкретному использованию индикаторов, связанных с традиционными почвообразующими факторами, модель SCORPAN использует пространственную автокорреляцию (Minasny et al., 2016). Grunwald расширила модель, рассматривая каждый почвообразующий фактор как функцию пространства и времени (Grunwald, 2006; Grunwald, 2009). На сегодняшний день в цифровой почвенной картографии распространены два взаимодополняющих подхода: подход почвенно-ландшафтных связей и подход на основе моделей пространственных автокорреляций. Среди отечественных работ, в которых использован геостатистический подход, можно выделить работы П.В. Красильникова (Геостатистика и география почв, 2007; Красильников, 2009), В.П. Самсоновой (Самсонова, 2008), Т.Т. Ефремовой с соавт. (Ефремова и др., 2013). Более ранние работы представлены работами Иванниковой с соавт. (Иванникова и др., 1988), Кузяковой с соавт. (Кузякова и др, 2001a; Кузякова и др., 2001b). Также малочисленны работы с использованием геостатистических методов в агропочвоведении (Гумматов и др, 1992;; Сидорова, 2007; Мелиховская, 2011; Сидорова, 2012; Самсонова и др., 2014; Самсонова и др., 2017). За последние несколько лет содержательный обзор истории развития подходов и методов к цифровой картографии почв дан в работах Mulder et al, (Mulder et al, 2011), Brevik et al. (Brevik et al., 2015), Жоголева (Жоголев, 2016), Симаковой М.С., Руховича Д.И. (Руководство ..., 2008), сборнике «Цифровая почвенная картография» (2012) и др.

Глава 2. Объекты и методы исследования

Исследования проводились на территории Заинского ГСУ (55°05'56.0"N 52°02'24.0"E) и Арского ГСУ (56°06'46.6"N, 49°46'31.4"E). Они являются представителями важнейших для Республики Татарстан природно-географических территорий, которые характеризуются различным почвенным покровом (рис. 1).

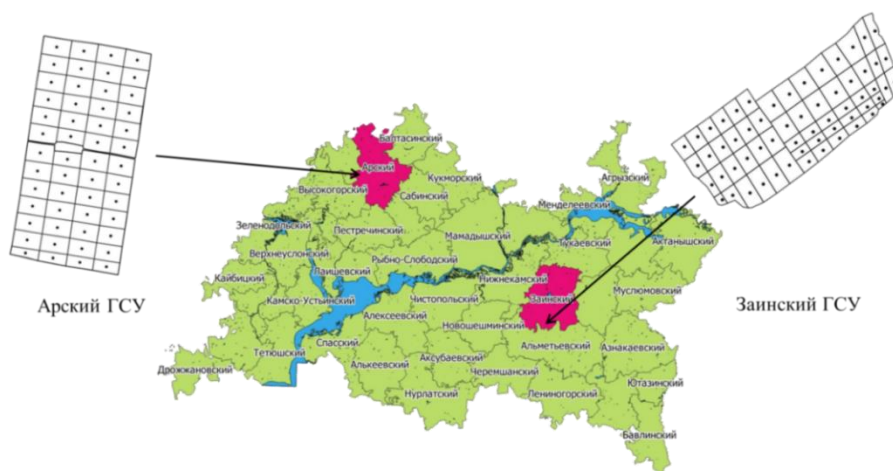


Рисунок 1. Расположение ГСУ на территории Республики Татарстан

Участки государственного сортоиспытания были выбраны для исследования по следующим причинам: а) Заинский ГСУ на протяжении около 80 лет (с 1939 года), Арский ГСУ – на протяжении около 70 лет (с 1953 года) испытывают постоянное схожее антропогенное воздействие. Однако, сортоиспытание культур проводится согласно методике, направленной на устранение влияния неоднородности почв; б) ГСУ были основаны на типичных участках, характеризующих почвенно-агроэкологические районы (Западное Предкамье и Восточное Закамье Республики Татарстан).

Заинский ГСУ расположен на территории Восточного Закамья, который относится к умеренно-расчлененной денудационной равнине нижнего плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности с преобладающими высотами 200 – 240 м. Обширные территории имеют слабо возвышенный и низменный характер рельефа. Территория сложена 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. Серые лесные почвы встречаются крупными пятнами в междуречьях крупных рек. Растительный покров имеет облик типичной северной

лесостепи. Согласно почвенной карте 1987 года почвенный покров Заинского ГСУ представлен вариациями черноземов выщелоченных тяжелосуглинистых на делювиальных карбонатных глинах, подстилаемых древнеаллювиальными отложениями. Северо-западная часть ГСУ представлена верхней частью водораздела, юго-восточная часть является слабопологим волнистым склоном ($< 5^\circ$) юго-восточной экспозиции (рис. 2).

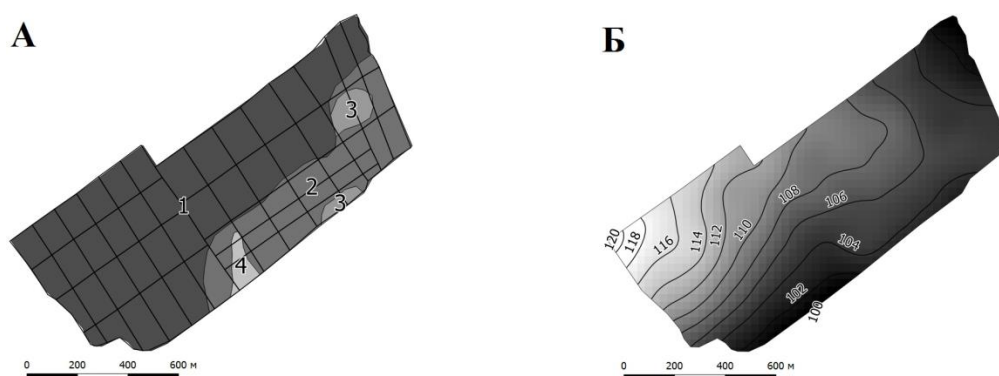


Рисунок 2. Почвенная карта (А) Заинского ГСУ и цифровая модель рельефа с изолиниями (Б). Цифрами на карте А обозначены почвы: черноземы выщелоченные среднегумусные тяжелосуглинистые мало- (3) и среднемощные (1) слабокаменистые (2) слабосмытые (4) на делювиальных карбонатных глинах (1–4), подстилаемых древнеаллювиальными отложениями (2 – 4). На карту А наложена сетка отбора проб.

Арский ГСУ расположен на территории Западного Предкамья Республики Татарстан. Район сложен породами татарского яруса верхней перми и представлен красновато-коричневыми мергелями и 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.

Значительная часть площади района представлена пахотными угодьями, современные остатки лесов принадлежат к хвойным и лиственным лесам. Почвенный покров района характеризуется распространением серых лесных и дерново-подзолистых почв. 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. На территории Арского ГСУ распространены вариации светло-серых лесных тяжелосуглинистых почв на карбонатных глинах и делювиальных суглинках, а также дерново-слабоподзолистых тяжелосуглинистых почв на

делювиальных суглинках. Рельеф представлен слабопологим склоном, постепенно снижающимся к южной части участка (рис. 3).

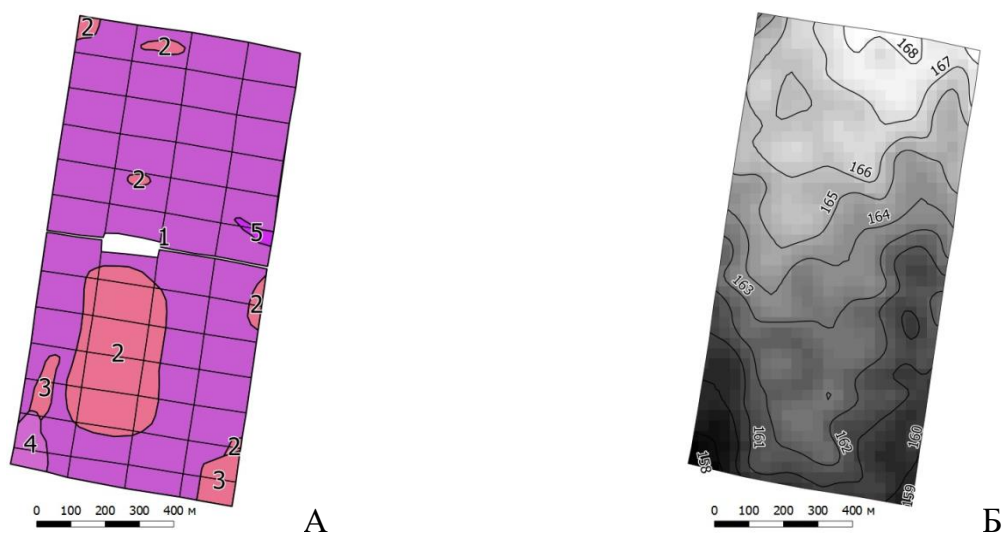


Рисунок 3. Почвенная карта (А) Арского ГСУ и цифровая модель рельефа с изолиниями (Б). Цифрами на карте А обозначены почвы: светло-серые лесные тяжелосуглинистые (1) пестроцветные (5) и слабосмытые (4) почвы на карбонатных глинах (1) и делювиальных суглинках (4 – 5) и дерново-слабоподзолистые тяжелосуглинистые (2 – 3) слабосмытые (3) почвы на делювиальных суглинках (2 – 3). На карту А наложена сетка отбора проб.

Территории ГСУ были поделены на прямоугольные элементарные участки (1 – 1,5 га) по схеме пробоотбора 1987 года. В каждом элементарном участке ручным пробоотборником на глубину пахотного слоя был отобран смешанный образец, состоящий из 20 – 25 единичных проб. Объединенные пробы были пространственно привязаны к центрам соответствующих элементарных участков. Было отобрано и проанализировано 52 (Арский ГСУ) и 60 (Заинский ГСУ) смешанных образцов. Количество проб почв соответствовало количеству проб обследований двух ГСУ 1987 года. В образцах были определены: гумус по Тюрину, подвижные формы фосфора и калия по Чирикову и Кирсанову, pH водной вытяжки потенциометрически, гидролизуемый азот по Корнфилду, гранулометрический состав по Качинскому-Робинсону-Кехлю с пробоподготовкой растиранием с пирофосфатом натрия.

Вариограммный анализ проводился для предварительно стандартизированных почвенных свойств, а именно было вычтено среднее из каждого значения и поделено на стандартное отклонение. Для оценки пространственного распространения почвенных свойств были использованы геостатистические методы (ординарный кригинг (ОК), регрессионный кригинг (RK)) и статистические методы (множественная линейная регрессия (MLR), регрессия на главные компоненты (PCR). Регрессионными моделями

описывалась детерминированная часть вариабельности почвенных свойств, стохастическая часть вариабельности учитывалась с помощью вариограмм остатков регрессионных моделей. В качестве предикторов выступали морфометрические характеристики, полученные из цифровой модели рельефа SRTM1 с пространственным разрешением 30 м. Модели регрессии оценивались по скорректированному коэффициенту детерминации ($R^2_{\text{скор}}$), который показывает описываемую моделью дисперсию. Точность пространственного прогноза оценивалась с помощью кроссвалидации (перекрёстной проверки) на основе показателей, рассчитанных на базе разности оригинального показателя и прогнозного значения, называемого ошибкой: усредненная ошибка (ME), среднеквадратичная ошибка (RMSE), соотношение дисперсии прогнозируемых значений к дисперсии наблюдаемых значений (R_{var}), коэффициента детерминации (R^2). Изменение точности методов оценивалось относительно RMSE ординарного кригинга, взятого в качестве стандарта (RI). Сравнение результатов обследований 1987 и 2011 года для двух ГСУ было проведено с использованием критерия Манна–Уитни на основе нормализованных значений почвенных свойств, поскольку методы определения почвенных показателей двух этапов различались. К примеру, содержание подвижного фосфора в 1987 году в Заинском ГСУ определялось с помощью метода Труога, а в 2011 – по методу Чирикова. Сравнение карт почвенных свойств проводилось по 200 случайным точкам с помощью коэффициента корреляции Спирмена. В пределах карт почвенных свойств было проведено выделение кластеров на основе метода нечеткой кластеризации с помощью ряда критериев: коэффициента разделения, энтропии разделения и индекса Xie-Beni. Для сравнения карт использовались статистики каппа и общей точности (Самсонова, Мешалкина, 2011).

Глава 3. Количественная оценка пространственной неоднородности почвенных свойств

В главе представлены морфологическое описание и физико-химические свойства почвенных разрезов, заложенных в 2011 году в местоположениях, близких местоположениям предыдущего почвенного обследования 1987 года.

Было подтверждено, что в Заинском ГСУ распространены черноземы выщелоченные среднемощные различной степени эродированности, гранулометрический состав которых характеризуются как тяжелосуглинистый или легкоглинистый крупнопылевато-иловатый. Почвообразующими породами являются делювиальные карбонатные суглинки и глины с подстиланием аллювиальных пород в южной части ГСУ. Почвенный покров Арского ГСУ характеризуют светло-серые

лесные среднетощные тяжелосуглинистые и легкосуглинистые иловато-крупнопылевые почвы на делювиальных карбонатных пермских суглинках и глинах (рис.4). Согласно почвенной карте 1987 года на территории Арского ГСУ также присутствуют дерново-слабоподзолистые тяжелосуглинистые почвы.

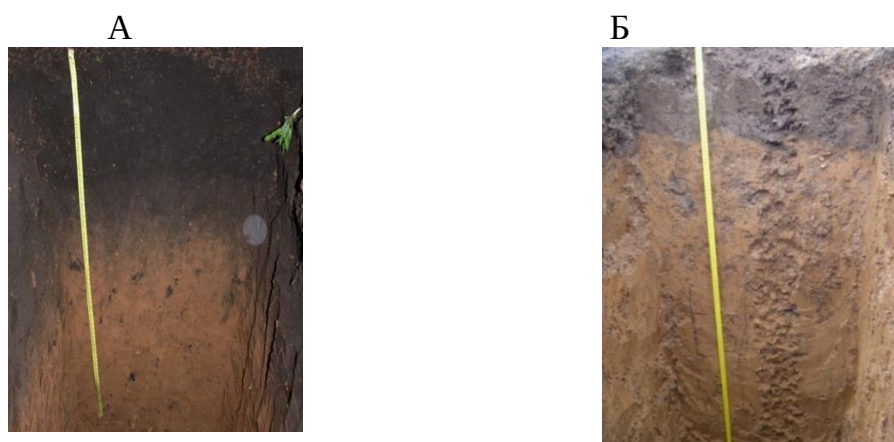


Рисунок 4. Профиль почв (А) Заинского ГСУ: чернозем выщелоченный среднетощный тяжелосуглинистый на делювиальных карбонатных суглинках и (Б) Арского ГСУ: светло-серая лесная среднетощная легкосуглинистая на делювиальных карбонатных глинах

Таблица 1. Описательные статистики по результатам почвенно-агрохимического обследования ГСУ 2011 года

Показатель	ГСУ	Гумус, %	Азот гидр., мг/кг	Фосфор подв., мг/кг	Калий подв., мг/кг	pH водн.	Физ, глина, %
Среднее	Заинский	6,9	206	239	176	6,4	51
	Арский	3,0	111	499	250	6,9	41
Медиана	Заинский	6,9	207	218	175	6,2	53
	Арский	3,0	109	486	240	6,9	41
Дисперсия	Заинский	0,7	638	5708	584	0,21	28
	Арский	0,2	340	30669	5272	0,15	3
Минимум	Заинский	4,0	157	111	136	6,0	36
	Арский	2,3	78	148	103	6,3	35
Максимум	Заинский	8,1	273	595	276	7,8	58
	Арский	4,3	157	781	426	7,7	44
V, %	Заинский	13	<u>12</u>	32	<u>14</u>	7	<u>11</u>
	Арский	13	<u>16</u>	35	<u>29</u>	6	<u>4</u>

По результатам теста Манна-Уитни свойства почв двух ГСУ значительно различаются при $\alpha=0.05$ (табл.1). Содержание гумуса и гидролизуемого азота значительно выше в почвах Заинского ГСУ, а содержание подвижного фосфора и калия – в почвах Арского ГСУ. Вариабельность показателей практически одинакова: низкая для pH, средняя для гумуса, гидролизуемого азота. Вариабельность подвижного

фосфора для двух ГСУ очень высокая, но подвижный калий характеризуется высокой вариабельностью лишь в Арском ГСУ и средней – в Заинском ГСУ.

Физическая глина Арского ГСУ имеет очень низкую вариабельность, но превышение коэффициента вариации в 2,8 раза в Заинском ГСУ статистически значимо; также значимы различия для гидролизуемого азота и подвижного калия. Различающиеся значения коэффициента вариации подчеркнуты в таблице 1.

Вариограмма гидролизуемого азота в Заинском ГСУ имеет форму чистого «наггет-эффекта», что указывает на отсутствие пространственных зависимостей. Пространственная структура остальных свойств описывается изотропными вариограммами. Вариограммы содержания гумуса, гидролизуемого азота и физической глины Арского ГСУ имеют тренды, указывающие на не случайность возникновения пространственной неоднородности. Для сопоставления с радиусами корреляции других показателей тренды были удалены по значениям пространственных координат. Автокорреляция 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 превышает 1000 м после удаления тренда (табл. 2).

Таблица 2. Параметры стандартизованных вариограмм почвенных свойств

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

Примечание: Sph – сферическая модель, Nug – модель наггет-эффекта

Соотношение (порог–наггет)/порог показывает долю пространственной зависимости. Соотношение > 75% свидетельствует о сильной, 75 – 25% – об умеренной и < 25% – о слабой пространственной зависимости. Пространственная структура гумуса, подвижных фосфора и калия в Заинском ГСУ характеризуется сильной пространственной зависимостью, а структура кислотности и физической глины –

умеренной автокорреляцией. У Арского ГСУ подвижный фосфор и кислотности имеют сильную пространственную зависимость, а подвижный калий – умеренную.

Глава 4. Оценка влияния морфометрических характеристик рельефа на пространственное распределение почвенных свойств

Всего была рассмотрена 31 морфометрическая характеристика рельефа. Они являлись производными цифровой модели рельефа и характеризовали не только уклон и экспозицию, но и водосборные площади, степень плоскостности и выпуклости участков, а также меру их топографической неоднородности.

Таблица 3. Предикторы моделей регрессии почвенных показателей

Предиктор	Гу-мус	Азот гидр.	Фосфор подв.	Калий подв.	pH	Физ. глина
Заинский ГСУ						
Southwestness (экспозиция участка)	+	+			+	+
MRRTF (плоскостность водоразделов)	+		+	+	+	+
MRVBF (плоскостность низин)	+		+			+
Stream power index (эрозионные участки)		+				
Terrain surface convexity (положительная кривизна поверхности)		+			+	+
Valley depth (глубина низин)			+			
Plan curvature (плановая кривизна)						+
Арский ГСУ						
VDCN (высота по базовому уровню)	+	+				+
Terrain ruggedness index (относительная локальная расчлененность рельефа)			+	+	+	
Mid-slope position (относительное положение склона)			+	+	+	
Catchment area (площадь водосбора)					+	

Результаты регрессионного моделирования указывают на сильные различия между двумя ГСУ по значимости рельефа на пространственное распределение почвенных свойств. В Заинском ГСУ преимущественное влияние на распределение свойств почв оказывают морфометрические характеристики рельефа, которые позволяют выделить склоновые и равнинные участки рельефа, характеризуют направление и силу распределения вещества в ландшафте, а также выпуклость поверхности (табл. 3). Расположение Заинского ГСУ на склоновом участке способствует развитию эрозионных процессов, что приводит к перераспределению питательных веществ и фракций гранулометрического состава на участке. С рельефом наиболее связано содержание гумуса ($R^2_{\text{скор.}} = 0,53$), подвижного фосфора ($R^2_{\text{скор.}} = 0,54$), физической глины ($R^2_{\text{скор.}} = 0,49$) и кислотность ($R^2_{\text{скор.}} = 0,51$).

Арский ГСУ находится на водоразделе и имеет более однородный рельеф.

Эрозионные процессы на этой территории выражены не так ярко, как в Заинском ГСУ, поэтому здесь наблюдается меньшее влияние морфометрических характеристик рельефа на пространственное распределение свойств почв. В моделях регрессии участвуют параметры, которые отражают относительную высоту точек отбора, а также локальную расчленённость рельефа. Наибольшие значения скорректированного коэффициента детерминации наблюдаются для кислотности ($R^2_{\text{скор.}} = 0,40$). Модели остальных показателей, кроме физической глины, имеют значения $R^2_{\text{скор.}}$ в пределах 0,26 – 0,37.

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 описывалось 23% дисперсии, которая осталась после модели регрессии гумуса. Вариограммами остатков 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.

Таким образом, детерминированная часть вариабельности почвенных свойств в Заинском ГСУ описывается регрессионными моделями на 23 – 54%, а в Арском ГСУ – на 13 – 40%. Доля оставшейся вариабельности почвенных свойств Заинского ГСУ на 13 – 75% описывается вариограммами остатков регрессионных моделей, тогда как в Арском ГСУ вариограммы позволяют описать 14 – 49% остаточной вариабельности. Остальная часть дисперсии приходилась на случайный компонент.

Оценка точности различных интерполяционных моделей после перекрестной проверки приведена в таблице 4. По коэффициенту детерминации модели значимо не отличаются. Наиболее точная модель имела наибольшее сочетание критериев оценки, соответствующих требованиям: $RI \rightarrow \max$, $ME \rightarrow 0$, $RMSE \rightarrow \min$, $R_{\text{var}} \rightarrow \max$. Таким образом, в Заинском ГСУ для содержания гумуса лучшим оказался метод ординарного кригинга. Модель регрессионного кригинга с множественной линейной регрессией наилучшим образом описала пространственное распределение гидролизуемого азота, подвижного фосфора и кислотности. Содержание подвижного калия и физической глины лучше всего удалось описать моделью регрессионного кригинга с главными компонентами. В Арском ГСУ содержание гумуса наилучшим образом описывалось с помощью модели регрессионный кригинг с главными компонентами, а содержание гидролизуемого азота, подвижных форм фосфора и калия, а также физической глины – с

помощью модели регрессионный кригинг с множественной линейной регрессией. Показатель кислотности лучше описывался 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. Таким образом, в различных случаях превосходство имеют различные модели, что зависит от пространственной структуры почвенных свойств (табл. 4).

Таблица 4. Результаты оценки точности моделей

Показатель	Модель	Заинский ГСУ				Арский ГСУ			
		ME	RMSE	RVar, %	RI	ME	RMSE	RVar, %	RI
Гумус, %	OK	-0,02	0,48	63	0	-0,001	0,33	39	0
	RK MLR	0,001	0,51	63	-6,25	0,001	0,34	31	-3,03
	RK PCR	-0,005	0,51	62	-6,25	0,002	0,33	51	0
Азот гидр., мг/кг	OK	-	-	-	-	0,016	16,86	21	0
	RK MLR	0,098	22,36	30	-	0,079	16,19	27	4,09
	RK PCR	-0,091	24,91	7	-	0,069	16,79	33	0,53
Фосфор подв., мг/кг	OK	-0,73	60,1	58	0	-0,902	104,05	72	0
	RK MLR	-0,09	55,90	64	6,97	-1,700	101,63	66	2,33
	RK PCR	-0,206	57,89	64	3,66	-0,943	108,10	64	-3,89
Калий подв., мг/кг	OK	0,08	22,2	34	0	-0,210	60,12	27	0
	RK MLR	0,14	20,07	45	9,68	-0,452	55,90	48	7,02
	RK PCR	0,171	19,86	40	10,62	-0,122	59,46	44	1,10
Кислотность	OK	0,002	0,39	14	0	0,009	0,20	72	0
	RK MLR	0,004	0,33	52	15,38	0,001	0,22	63	-10,00
	RK PCR	0,002	0,39	45	0	0,002	0,21	66	-5,00
Физ. глина, %	OK	0,007	4,10	26	0	-0,006	1,78	12	0
	RK MLR	-0,017	4,10	51	-0,24	0,004	1,72	15	3,37
	RK PCR	-0,024	4,02	49	1,95	0,002	1,80	18	-1,12

Примечание: Жирным шрифтом выделены значения критериев оценки, соответствующие требованиям наилучших моделей

Глава 5. Сравнительная оценка пространственного распределения почвенных свойств разновременных обследований

Последние наиболее полные почвенно-агрохимические обследования Заинского и Арского ГСУ были проведены в 1987 году. Статистические оценки результатов обследований 1987 года приведены в таблице 5.

В Заинском ГСУ при уровне значимости $\alpha=0,05$ статистически различаются разновременные данные гумуса, подвижного фосфора и кислотности, а в Арском ГСУ – подвижного калия и кислотности.

Сравнение коэффициентов вариации Заинского ГСУ показало, что по истечении 25 лет вариабельность гидролизующего азота остается средней, низкой для кислотности и очень высокой для подвижного фосфора. Вариабельность гумуса увеличивается с

низкой градации в 1987 году до средней в 2011 году, а вариабельность подвижного калия изменяется с очень высокой в 1987 году до средней в 2011 году. Разница коэффициентов вариации разновременных обследований статистически значима для содержания гумуса, гидролизуемого азота и подвижного калия.

Таблица 5. Описательные статистики по результатам почвенно-агрохимического обследования ГСУ 1987 года

Показатель	ГСУ	Гумус, %	Азот гидр., мг/кг	Фосфор подв., мг/кг	Калий подв., мг/кг	pH сол.
Среднее	Заинский	7,5	64	500	197	5,3
	Арский	3,1	85	313	218	5,4
Медиана	Заинский	7,5	61	447	198	5,1
	Арский	3,1	84	301	207	5,4
Дисперсия	Заинский	0.6	106	32556	7325	0.2
	Арский	0.2	442	6580	2029	0.1
Минимум	Заинский	5,5	51	71	75	4,9
	Арский	2,4	51	174	161	5,1
Максимум	Заинский	8,8	86	1292	490	7,0
	Арский	4,0	136	462	366	6,7
V, %	Заинский	10	16	36	43	9
	Арский	13	25	26	37	5

В Арском ГСУ к 2011 году вариабельность гумуса остается средней, а для кислотности – низкой. Вариабельность гидролизуемого азота изменяется с высокой в 1987 году до средней в 2011 году. Для подвижного фосфора вариабельность изменяется с высокой (1987) до очень высокой (2011), а для подвижного калия – с очень высокой (1987) до высокой (2011). Тем не менее, в Арском ГСУ статистически значимых различий для коэффициентов вариации почвенных показателей не обнаружилось.

Сопоставление вариограмм стандартизированных данных показало, что за 25 лет сельскохозяйственной деятельности пространственная структура почвенных показателей Заинского ГСУ изменилась незначительно. Радиусы корреляции для почвенных показателей 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 (рис.5). Лишь для гидролизуемого 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



Пространственная зависимость показателей Заинского ГСУ в основном была и осталась сильной, то есть доля пространственных зависимостей в варьировании составляет более 75%. Лишь для гумуса наблюдается умеренная пространственная зависимость в 1987 году (63%), но сильная – в 2011 году (98%). 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%)). Изменения могут быть связаны с ограничением использования удобрений, что способствовало уменьшению доли искусственно создаваемой случайности при неравномерном внесении элементов питания.

показателей от морфометрических характеристик рельефа может быть объяснено их более значительным перераспределением по элементам рельефа. Причиной этого, вероятно, является уменьшение доли использования удобрений с конца 80-х годов. К этому накладывается развитие эрозионных процессов, которое также привело к дифференциации в пространстве показателей почвенного плодородия за 25 лет сельскохозяйственного использования.

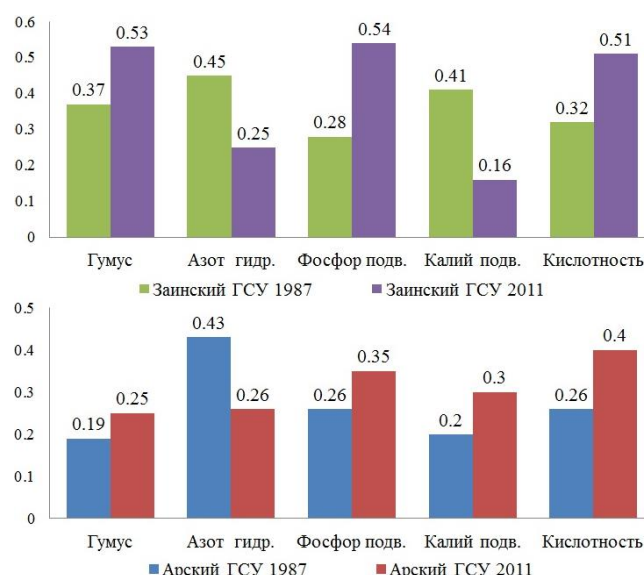


Рисунок 6. Коэффициенты детерминации моделей множественной линейной регрессии для ГСУ в разные периоды обследования. По оси ординат указано $R^2_{\text{с корр.}}$.

Сопоставление итоговых моделей интерполяции обследований 1987 и 2011 года показало, что в 1987 году содержание гумуса, гидролизуемого азота, подвижного фосфора и кислотности в Зайнском ГСУ наилучшим образом интерполируется методом регрессионного кригинга с множественной линейной регрессией, а подвижный калий лучше всего интерполируется методом регрессионного кригинга с главными компонентами.

Таблица 6. Наилучшие итоговые модели интерполяции разновременных обследований двух ГСУ

Показатель	Зайнский ГСУ			Арский ГСУ		
	ОК	RK MLR	RK PCR	ОК	RK MLR	RK PCR
Гумус	●	▲			▲	●
Азот гидролизуемый		● ▲			● ▲	
Фосфор подвижный		● ▲			●	▲
Калий подвижный			● ▲		●	▲
Кислотность		● ▲		●	▲	
Физическая глина			●		●	

ОК – метод ординарного кригинга, RK MLR – метод регрессионного кригинга с множественной линейной регрессией, RK PCR – метод регрессионного кригинга с главными компонентами. Символом ▲ отмечен 1987 год, символом ● – 2011 год

В Арском ГСУ в 1987 году метод регрессионного кригинга с множественной линейной регрессией оказался более точным методом интерполяции для содержания гумуса, гидролизуемого азота и кислотности, а метод регрессионного кригинга с главными компонентами – для подвижных форм фосфора и калия (табл. 6).

Коэффициенты корреляции между цифровыми картами показывают, что пространственная структура большинства свойств почв двух ГСУ сохраняется по истечении времени (табл.7). В Заинском ГСУ наиболее сопоставимы между собой 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.

Таблица 7. Коэффициенты корреляции между интерполированными картами почвенных свойств для 1987 года и 2011 года по 200 случайным точкам (все коэффициенты отличны от нуля при $\alpha=0,05$)

ГСУ	Гумус	Азот гидр.	Фосфор подв.	Калий подв.	Кислотность
Заинский	0,62	0,29	0,74	0,58	0,71
Арский	0,62	0,79	0,49	0,59	0,28

В пределах итоговых цифровых карт почвенных свойств было проведено выделение кластеров с близкими по почвенным свойствам значениями. В большинстве случаев по агрохимическим показателям территория двух ГСУ может быть поделена на два кластера. Лишь в случае гидролизуемого азота (1987 год) и подвижного калия (2011 год) Заинского ГСУ, а также в случае подвижного калия (2011 год) Арского ГСУ количество кластеров равнялось 5 – 6.

Наложение границ кластеров на интерполированные карты свойств почв наглядно выявило отличающиеся друг от друга по значениям почвенного свойства зоны в пределах ГСУ (рис. 7). В большинстве случаев для Заинского ГСУ кластеры выделяются по эродированным областям участка. Для Арского ГСУ в ряде случаев кластеризация приводит к разделению участка на северную и южную части. Форма Арского ГСУ в виде вытянутого полигона, вероятно, способствовала назначению агротехнических мероприятий по северной и южной частям участка, что привело в дальнейшем к перераспределению почвенных показателей. К примеру, северная и южная часть ГСУ отчетливо различается по содержанию гидролизуемого азота. Небольшие участки смытых 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.

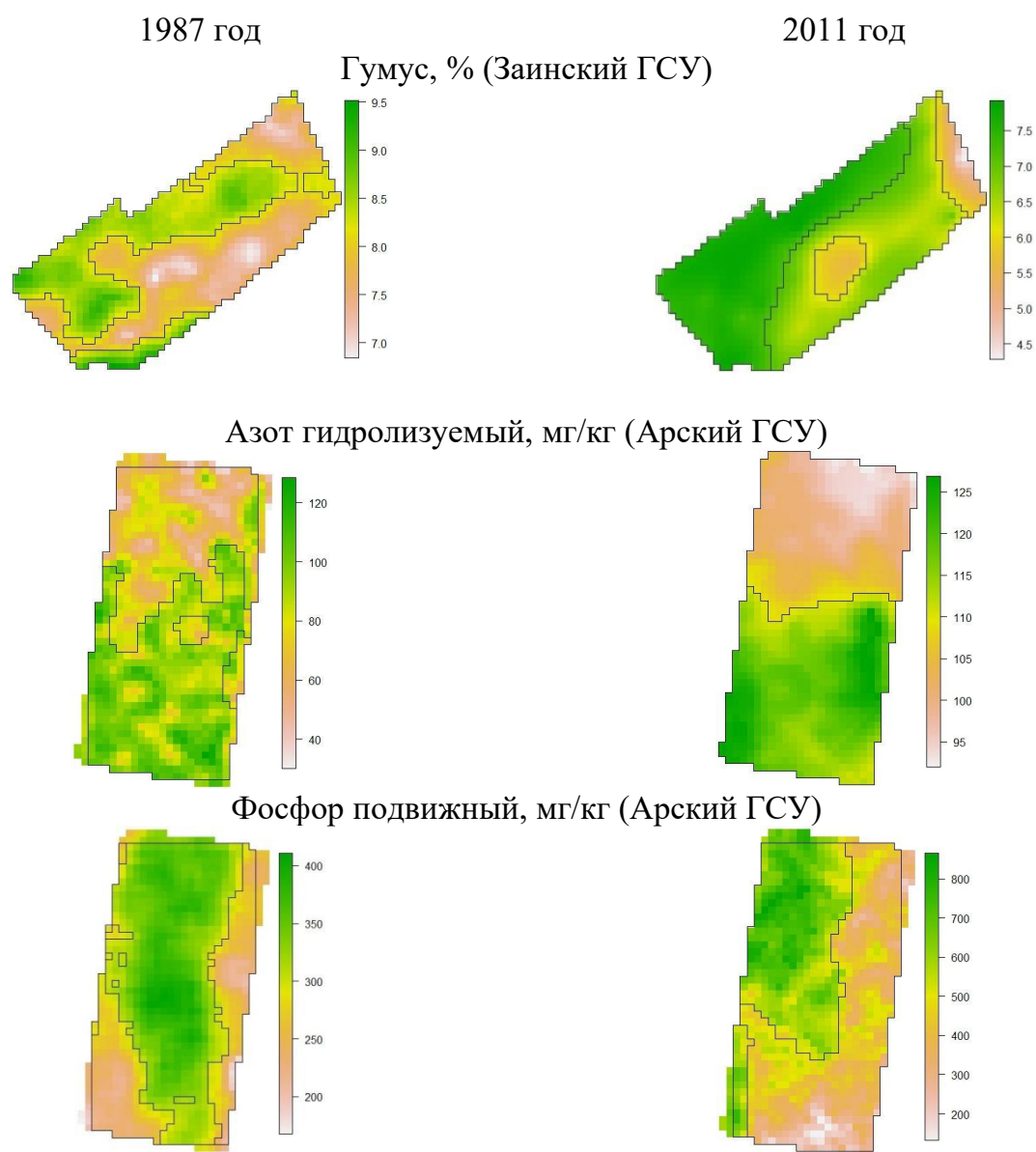


Рисунок 7. Пример наложения кластеров на интерполированные карты почвенных свойств двух ГСУ для обследования разных лет

Была оценена согласованность между кластерами почвенных свойств разновременных обследований (табл. 8).

Таблица 8. Оценка согласия кластеров почвенных свойств между интерполированными картами 1987 и 2011 года

	Гумус	Азот гидро- лизующий	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

Интерпретация значений каппа: меньше нуля – случайное совпадение; 0,01 – 0,20 – слабое согласие; 0,21 – 0,40 – удовлетворительное; 0,41 – 0,60 – умеренное; 0,61 – 0,80 – существенное; 0,80 – 0,99 – почти полное согласие (Минаев, 2020). Наибольшее соответствие было обнаружено для Заинского ГСУ. Удовлетворительно согласуются между собой кластеры для гумуса, а умеренно – для подвижного фосфора и кислотности. Кластеры гидролизуемого азота слабо согласуются, поскольку на 1987 год их количество в 3 раза превышало количество кластеров на 2011 год. Для Арского ГСУ наибольшее значение статистики каппа было обнаружено для гидролизуемого азота, наименьшее значение отмечено для кислотности почв. В целом для Арского ГСУ наблюдается пространственное перераспределение показателей почвенного плодородия по сравнению с предыдущим обследованием, тогда как в случае Заинского ГСУ картина распределения почвенных свойств в пространстве изменяется незначительно.

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. 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%.

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.5.19 (03.02.13) - почвоведение

1. Smirnova E.V., Giniyatullin K.G., **Sahabiev I.A.**, Okunev R.V. Comparison of interpolated soil nutrients maps obtained with application of various approaches of ordinary kriging // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 548(3). – P. 032027. DOI: 10.1088/1755-1315/548/3/032027. CiteScore по Scopus = 0,5 (2020), Q4.

2. **Сахабиев И.А.**, Смирнова Е.В., Гиниятуллин К.Г., Гордеева К.А., Латыпова Л.И. Оценка разных схем составления объединенных проб для создания интерполированных карт обеспеченности пахотных угодий доступными элементами питания // Плодородие. – 2020. – №4(115). – С. 47–52. DOI: 10.25680/S19948603.2020.115.14. IF (2020) = 0,607.

3. **Sahabiev I.A.**, Ryazanov S.S., Kolcova T.G., Grigoryan B.R. Selection of a Geostatistical Method to Interpolate Soil Properties of the State Crop Testing Fields using Attributes of a Digital Terrain Model // Eurasian soil science. – 2018. – Vol.51. – Is.3. – P.255-267. DOI: 10.1134/S1064229318030122. CiteScore по Scopus = 1,5 (2018), Q3.

4. **Sahabiev I.A.**, Giniyatullin K.G., Ryazanov S.S. 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 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol.107. – Is.1. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012122. CiteScore по Scopus = 0,3 (2018), Q4.

5. **Сахабиев И.А.**, Рязанов С.С., Григорьян Б.Р. Оценка пространственной вариабельности свойств почвенного покрова территории государственной сортоиспытательной сети // Плодородие. – 2017. – №2 (95). – С. 26-31. IF (2017) = 0,411.

6. Ryazanov S.S, **Sahabiev I.A.** Comparison of terrain-based drift models to improve the quality of soil predictive mapping at a field scale // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2016. – № 4 (36). – С. 21-33. DOI: 10.17223/19988591/36/2. IF (2016) = 0,550.

7. Ryazanov S.S, **Sahabiev I.A.**, Grigoryan B.R. Regional geo-statistical operation model of soil humus-content, acidity and structure distribution with geo-morphometric data use // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol.10. – №24. – P.44696-44704. CiteScore по Scopus = 0,1 (2015), Q4.

8. Крыщенко В.С., Голозубов О.М., **Сахабиев И.А.**, Литвинов Ю.А. Применение ГИС-технологий для мониторинга земель Заинского государственного сортоиспытательного участка Республики Татарстан // Вестн. Том. гос. ун-та. – 2013. – № 366. – С. 180–183. IF (2013) = 0,273.

9. Савельев А.А., Григорьян Б.Р., Добрынин Д.В., Мухарамова С.С., Кулагина В.И., **Сахабиев И.А.** Оценка почвенного плодородия по данным дистанционного зондирования Земли // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2012. – Т.154. – кн.3. – С.158-172. IF (2016) = 0,159.

Другие работы:

12 работ опубликовано в трудах и материалах российских и международных конференций, разработано 2 базы данных, зарегистрированных Федеральной службой по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). Полный список публикаций на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/profile/lnas/>