



**Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова**

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ГЕОГРАФИИ И ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЯ**

Мурман Анна Сергеевна

**Структура и функциональная организация ландшафтов Матыро-
Воронежского междуречья Тамбовской равнины**

ВЫПУСКНАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Работа допущена к защите

«__» _____ 20__ г.

(подпись)

Научный руководитель:

доц., к.г.н.

Татьяна Игоревна Харитонова

Научный консультант:

доц., к.г.н.

Козлов Даниил Николаевич

Рецензент:

м.н.с. Меркалова Ксения Алексеевна

Москва - 2020

Оглавление

Введение	2
Глава 1. Структурно-функциональная организация ландшафтов	5
1.1 Теоретические основы изучения СФО	5
1.2 Особенности СФО Окско-Донской низменности	9
1.3 Методы изучения СФО	10
Глава 2. Физико-географическая характеристика Матыро-Воронежского междуречья (МВМ)	17
2.1 Геолого-геоморфологическое строение.	17
2.2 Климатическая характеристика.	24
2.3 Морфологическая структура и хозяйственное использование типов местности МВМ.	25
Глава 3. Моделирование перераспределенного слоя осадков и почвенно- ландшафтных связей	31
Глава 4. Структурно-функциональная организация ландшафтов Матыро- Воронежского междуречья	40
4.1 Моделирование почвенно-ландшафтных связей методом линейного дискриминантного анализа.....	40
4.2 Моделирование почвенно-ландшафтных методом random forest	55
4.3 Моделирование почвенно-ландшафтных связей методом опорных векторов ...	60
4.4 Анализ результатов моделирования ПЛС разными методами	63
Заключение.....	70
Список литературы.....	73

Введение

Актуальность темы. Еще в начале XX века отечественные ученые (В.В. Докучаев, [12]; К.Д. Глинка [8]) высказывали мысли о необходимости ландшафтного подхода к организации земледелия в нашей стране, об учёте зависимости систем земледелия от геоморфологических, гидрологических и иных природных условий, которые

нашли поддержку широкого круга специалистов [5, 18, 19, 31]. Они получают все большее применение в сельском хозяйстве, в т.ч. их эффективность была доказана опытным путем на участках ПАО «Роговатовская Нива» в Белгородской области [14]. В связи с необходимостью увеличения урожайности сельскохозяйственных культур, оптимального использования удобрений и почвенно-грунтовой влаги в настоящее время спрос на разработку адаптивно-ландшафтных систем земледелия (АЛСЗ) для конкретных хозяйств и агрофирм существенно возрастает [6, 40]. Достижение максимального эффекта возможно благодаря применению точной техники, определенных сортов растений и, конечно, обязательному учету ландшафтных особенностей территории, межкомпонентных взаимодействий и структурно-функциональной организации (СФО). Под СФО в данном контексте понимается единство сочетания элементарных почво- и ландшафтообразующих процессов с морфологической структурой ландшафта. И это, в свою очередь, является одним из ключевых направлений ландшафтоведения и изучается на разных иерархических уровнях [47]. Из всех подсистем, описывающих СФО, одной из широко используемых, хорошо разработанных и доступных в условиях агроценозов выступают почвенно-ландшафтные связи, в то время как прямые наблюдения за функционированием геосистем довольно трудоемки, сложны и проводятся в основном на стационарах (например, исследования Н.И. Базилевич, В.Б. Сочавы, Н.Л. Беручашвили). Почвенный покров же, напротив, подробно описан и отражает многолетний режим функционирования ландшафтов. Детальное изучение почвенно-ландшафтных связей осуществляется современными косвенными методами: геоморфометрического и статистического анализов, методами цифровой почвенной картографии, которые активно внедряются в практику Д.Н. Козловым, В.В. Сысуюевым, В.И. Кирюшиным [21, 30, 40, 62]. В качестве фактора дифференциации рассматривается рельеф, который задает направление и интенсивность вещественно-энергетических потоков и определяет состояние других компонентов. Это может показаться недостаточным для того, чтобы говорить о рассмотрении почвенно-ландшафтных связей, однако в условиях однородных почвообразующих пород и схожего литологического состава это допустимо.

Ключевой участок междуречья, расположенный в пределах Окско-Донской низменности, является довольно однородным с точки зрения почвообразующих

пород и литологического состава, благодаря чему рельеф выступает главным фактором дифференциации. Однако имеющееся там разнообразие почв в пределах одного междуречья представляет не только большой практический, но и научный интерес, связанный с изучением действия различных почвообразующих процессов при их формировании, местными геолого-геоморфологическими особенностями и влиянием грунтовых вод, а также с текущим функционированием этих почв, которое важно с точки зрения хозяйственного использования. В связи с этим изучение определяющих процессов, установление закономерностей и зависимостей необходимо для оценки потенциала почвы и мер, направленных в данном случае на получение максимальной урожайности сельскохозяйственных культур. Так, например, многочисленные понижения с высоким стоянием грунтовых вод и формированием солодей или осолоделых почв препятствуют интенсификации сельского хозяйства, а в некоторых случаях исключают его как вариант землепользования. Ввиду того, что определяющую роль на формирование морфологической структуры играет гидроморфизм, важным аспектом в изучении СФО является оценка водно-миграционных связей, их качественный и количественный анализ. Стоит отметить, что изучение почвенно-ландшафтных связей делает возможной интерполяцию описанных почв на территорию всего междуречья, что в дальнейшем позволит подобрать оптимальную культуру и систему земледелия.

Цель настоящей работы заключается в выявлении закономерностей структурно-функциональной организации ландшафтов Матыро-Воронежского междуречья (МВМ) через подсистему почва-ландшафт и в картографической интерпретации результатов.

Задачи, поставленные перед работой, сводятся к следующим:

1. Знакомство с научно-методическими основами изучения СФО ландшафтов
2. Знакомство с региональными особенностями Окско-Донской низменности и Тамбовской равнины в частности
3. Подготовка факторно-индикационной основы для моделирования
 - Создание цифровой модели рельефа (ЦМР)
 - Расчет серии морфометрических характеристик

- Подготовка точек и базы данных комплексных почвенных описаний
4. Моделирование функциональных особенностей стока МВМ
 5. Моделирование почвенно-ландшафтных связей МВМ
 - Определение ведущих факторов дифференциации ландшафтов
 - На их основе моделирование морфологической структуры
 6. Сравнение разных методов моделирования

Автор выражает благодарность Т.И. Харитоновой за ценные советы и комментарии, Д.Н. Козлову за помощь в подборе оптимальных параметров, методов моделирования, предоставление данных и информационное сопровождение, сотрудникам отдела «агроэкологической оценки почв и проектирования агроландшафтов» Почвенного института им. В.В. Докучаева за помощь в подготовке материалов, а также О. Железному за помощь в решении проблемы с некоторыми моделями.

Глава 1. Структурно-функциональная организация ландшафтов

1.1 Теоретические основы изучения СФО

Исследователей всегда интересовал вопрос, как же устроен природно-территориальный комплекс, согласно каким законам функционирует и какие процессы определяют его структуру. Эти размышления привели к созданию многочисленных учений (В.Н. Солнцев, А.А. Крауклис, Ф.И. Козловский), целью которых является объяснение сложной организации природных систем и формализация связей. В ландшафтоведении развитие теоретических наработок привело к созданию трех подходов к изучению СФО: структурно-генетическому, функциональному и типологическому.

Структурно-генетическое направление основано на понимании ландшафта как генетически однородного комплекса с иерархической организацией составляющих его морфологических единиц [39, 48]. Свойства природной среды оцениваются с точки зрения их отношения к факторам (геологическим, климатическим, биотическим), которые могут иметь как статическую, так и динамическую природу. При сходстве действующих факторов формируются однородные системы. Примером приуроченности к конкретной форме рельефа с происходящими там водно-миграционными процессами могут быть солоды, формирующиеся в

небольших западинах лесостепи с повышенным уровнем грунтовых вод. То есть, при наличии однородных факторов среды и под влиянием одних и тех же процессов можно ожидать появление солодей в сходных условиях на другой территории. Как правило, предварительная группировка геосистем, основанная на сходстве факторов, предшествует созданию классификации и в целом типологическому подходу из-за ее несовершенства и некой искусственности [33].

Последние работы в области структурно-генетического направления науки по моделированию межкомпонентных связей находят свое отражение в моделировании ландшафтных факторов формирования многообразия структур почвенного покрова (СПП) [13]. В связи с этим возникает отсылка к учению о СПП, детально разработанному В.М. Фридландом. Под СПП понимают «совокупность всех однообразных неоднородностей почвенного покрова суши» [45]. Каждую СПП составляет набор почв, которые образуют устойчивую структуру, рисунок и связи, а также связанных общей историей развития. Наименьшими единицами почвенного покрова являются элементарные почвенные ареалы (ЭПА), занимающие ограниченные площади и связанные с влиянием местных условий (пятна подзолистых почв под елями на фоне дерново-подзолистых). Будучи генетически связанными друг с другом, они объединяются в различные почвенные комбинации [45].

Идеи Фридланда совместно с учением В.В. Докучаева [11], переработанные в последующие годы Йенни [59], стали основой для развития современной цифровой почвенной картографии. В качестве новой теоретической базы, учитывающей территориальное соседство, предложена модель SCORPAN, окончательно сформулированная австралийским ученым А. МакБратни [64]. Она представляет собой описание взаимосвязей между почвой и факторами почвообразования:

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

где S_c – почвенные таксономические единицы, S_a – количественные почвенные параметры, s – почва (её характеристики), c – климатические особенности, o – живые организмы, r – рельеф и производные характеристики, p – литологические особенности и материнская порода, a – возраст, n – положение в пространстве

Ключевым понятием *функционально-динамического* направления выступает геосистема, введенная В.Б Сочавой. Из ее определения следует, что ее компоненты находятся в тесной взаимосвязи друг с другом благодаря системообразующим потокам вещества и энергии и функционируют как единое целое [41, 42]. Было установлено, что геосистема характеризуется наличием радиальных и латеральных потоков, первые из которых проявляются в системе геогоризонтов, в то время как вторые образуют пространственную неоднородность – морфологическую структуру ландшафта. Структурно-генетическое направление в последнее время тесно переплетается с функционально-динамическим из-за связи морфологической структуры с процессами, под воздействием которых она формируется [47]. По мере развития представлений о ландшафте выработались различные понимания пространственных структур: парагенетические, генетико-морфологические, бассейновые, позиционно-динамические и биоцентрично-сетевые [9]. В настоящей работе применяется генетико-морфологический подход, опирающийся на генезис и возраст почвообразующих пород. Однако при этом осуществляется поиск информативных характеристик рельефа, способных описать неоднородность территории и выделить разнообразные ландшафтные структуры. Вместе с тем, традиционный подход к изучению процессов как факторов дифференциации дополняет современные идеи об описании процессов через пространственные морфологические структуры. По их особенностям на основании современных дистанционных и геоинформационных методов возможно выявление системообразующих потоков и континуальных свойств ландшафта [47].

В процессе развития науки появились разные подходы к оценке роли составляющих СФО: инертной, мобильной и биолого-биогеохимической [27]. Так, инертность (геостационарность) обеспечивается геолого-геоморфологическими особенностями, поскольку субстрат является наиболее устойчивым компонентом и характеризуется большим характерным временем [2, 38]. Устойчивая основа закрепляет геосистему в пространстве и определяет условия для формирования более подвижных компонентов. Мобильность (геоциркуляционность) связана с потоками вещества и энергии (водными, воздушными, внутрипочвенными), выполняющими транзитные [23] и обменные [25] функции. Благодаря этим потокам осуществляется миграция химических элементов и питательных веществ, формируются катены. Наконец,

биолого-биогеохимическая (биоциркуляционная) составляющая представляет собой живую часть геосистемы с характерными внутренними миграционными потоками и определяет ее текущее функционирование с конкретными геохимическими, биологическими и иными свойствами [27].

Особенности изучения циркуляционных процессов были детально разработаны И.П. Герасимовым [7], который писал о неоднородности почвенно-ландшафтного покрова, возникающей в результате трансформации компонентами ландшафта действующих вещественно-энергетических потоков. Его знаменитая триада «фактор-процесс-свойство» объясняет формирующуюся мозаику пространственной структуры (свойство) как результат переноса и трансформации вещества и энергии (процесс), интенсивность которых задает исходная неоднородности территории (фактор).

Изменения, затрагивающие геосистему, чутко фиксируются почвенно-растительным покровом как наиболее отзывчивым компонентом ландшафта. В этой связи он служит хорошим индикатором, по которому могут быть отслежены различные нарушения. Однако растительность в условиях агроценозов не является репрезентативным компонентом, поэтому в настоящей работе почвы рассматриваются как «зеркало» ландшафта, и изучение СФО проводится по ним.

Функциональный подход подразумевает изучение текущих в настоящее время процессов и взаимосвязей внутри геосистемы. Здесь рассматриваются потоки веществ и энергии, приводящие к территориальной дифференциации. В результате происходит выделение структуры геосистемы и ее внешних границ [33, 38]. Например, с помощью данного подхода можно установить границы между почвами, сменяющимися по катене от водораздела к поймам. Однако стоит обратить внимание, что функционирование здесь не определяется исключительно внутренними связями в почвенном горизонте: большую роль играют внешние процессы и потоки. В связи с этим назревает необходимость поиска глобальных систем, описывающих многие, если не все, компоненты.

Типологический подход основан на выявлении сходств и различий между свойствами и создании их классификаций. Полученные единицы низших рангов, как правило, не пересекаются в пространстве (ареалы черноземов типичных и лугово-

черноземных почв). При объединении нескольких простых свойств возможно получить комплексную систему и осуществить районирование. Набор разных исходных параметров позволяет создать системы районирования, пригодные для различных целей и характеризующих разнообразными свойствами [33]. Типологический подход нашел реализацию в трудах Ф.Н. Милькова [29]. Для Окско-Донской низменности им было предложено 5 типов местностей, выделяемых по сочетанию зональных и азональных факторов: междуречный недренированный, плакорный, приречный, надпойменно-террасовый, пойменный [28].

1.2 Особенности СФО Окско-Донской низменности

Морфологическая структура территории представлена набором междуречных и долинных комплексов. К первым относятся непосредственно плоские поверхности междуречий, западины, плакоры; ко вторым – склоны, террасы, поймы и элементы овражно-балочной сети. Различия в происхождении, положении относительно друг друга и воздействии внешних сил определяют разнообразие действующих процессов в каждой структурной единице.

Особенности функционирования ландшафтов средней части лесостепной зоны определяются набором элементарных процессов, как почво-, так и ландшафтообразующих. К элементарным почвенным процессам (ЭПП) относятся оглеение (проявляется в виде присутствия марганцевых и железистых примазок и конкреций), выщелачивание (вымывание карбонатов за пределы профиля или в его нижнюю часть; определяется по глубине вскипания от HCl), гумусонакопление (по содержанию гумуса в разных горизонтах почв и их мощности).

На недренируемых плоских междуречьях лесостепи первостепенное значение имеют водно-миграционные процессы над остальными. Элементарные ландшафтообразующие процессы (ЭЛП) в данном случае включают в себя перераспределение влаги по элементам рельефа и ее аккумуляцию в понижениях (при благоприятном для этого механическом составе отложений), а также особенности динамики грунтовых вод. Индикаторами водного режима выступают почвы разной степени гидроморфизма: черноземы типичные → черноземы выщелоченные → лугово-черноземные → черноземно-луговые.

Сезонное изменение глубины залегания грунтовых вод активно влияет на текущее функционирование почв. Так, например, в фоновых лугово-черноземных почвах междуречья колебания грунтовых вод происходят на глубине 3-6 метров. Для них характерен водный режим промывного типа, и даже в самые засушливые годы их профиль не иссушается до влажности завядания, а уже с 2-2.5 м (глубина весеннего промачивания – зона повышенного увлажнения) естественная влажность часто оказывается равной полной влагоемкости. С нарастанием увлажнения интенсивность выщелачивания карбонатов и оглеение горизонтов увеличиваются, что может приводить к переходу почв в другую таксономическую категорию. Вместе с тем происходит увеличение запасов гумуса в полугидроморфных почвах по сравнению с автоморфными черноземами типичными на 0.5-0.7% и их уменьшение в гидроморфных черноземно-луговых. Благодаря анализу большого количества образцов было установлено, что максимальное содержание гумуса характерно для почв, функционирующих в условиях небольшого поверхностного переувлажнения с залеганием грунтовых вод на глубине 3-4 м [3]. При этом максимальная продуктивность для полугидроморфных почв характерна в сухие годы, когда дополнительные запасы влаги способствовали увеличению урожая, в то время как во влажные тенденция была обратной [51].

Многочисленные западины выступают неотъемлемым структурным элементом и играют важную роль в функционировании через регуляцию уровня грунтовых вод, концентрируя сток. Кроме того, в условиях повсеместной распаханности они служат убежищами для животных, в том числе и роющих, которые участвуют в формировании особой структуры почв и перераспределении потоков. Иные показатели функционирования ландшафтов (например, запасы и соотношение биомасс) не являются репрезентативными ввиду практически полного отсутствия коренной растительности и ее замещения сельскохозяйственными культурами.

1.3 Методы изучения СФО

Современные методы моделирования и статистики позволяют изучать многие процессы, протекающие в природе, и получать количественное подтверждение имеющихся связей и достоверные результаты анализа. Именно поэтому они широко внедрены в процесс познания функционирования геосистем различных рангов и их

отдельных компонентов. В настоящей работе из статистических методов был использован дискриминантный анализ [44]. В качестве алгоритмов машинного обучения предлагается метод random forest (ансамбль деревьев решений, бутстреп агрегирование или бэггинг; [49]) и метод опорных векторов [70].

Для того, чтобы анализ почвенно-ландшафтных связей, особенностей функционирования территории стал возможен, необходимо создать *цифровую модель рельефа* (ЦМР), которая бы с высокой точностью давала данные о высотах местности. Помимо имеющихся в свободном доступе ЦМР (SRTM, ASTER GDEM, ALOS), которые в данном случае не используются ввиду низкого разрешения, существует большое количество разнообразных методов, благодаря которым можно самостоятельно построить такие модели: интерполяции (например, кригинг [63, 67], радиальных базисных функций [65]), аппроксимации (метод наименьших квадратов [58]). Многие из них в качестве входных данных требуют набор точек высот с уникальной парой координат, однако при таком подходе теряется существенная часть информации, связанная с геометрической структурой изолиний. Чтобы этого избежать, предлагается использовать метод построения ЦМР по горизонталям, реализованный в ПО «Surfer» [24, 60]. Данная модель является достоверной по высотам, то есть построенные по ЦМР изолинии аналогичны исходным, и их точность зависит от метода вычисления координат и шага сетки. Кроме того, соблюдается топологическая достоверность между элементами рельефа, модель также является гидрологически достоверной.

При создании ЦМР обычно применяются методы, основанные на обработке растра (вычисление среднего по четырём профилям [50], интерполяция на основе триангуляции с ограничениями [37], интерполяция на основе расчета расстояния до ближайших изолиний [54]), в связи с чем происходит потеря части информации, связанной с соседством изолиний, и возникает сложность с автоматическим выделением локальных экстремумов. Кроме того, необходимо обращать внимание на выбор шага сетки для того, чтобы не происходило попадание изолиний разного уровня в один пиксел. В методе, учитывающем неоднородное размещение исходных точек и способном моделировать гидрографические объекты, используются сплайны с натяжением [57]. Однако возникает угроза получения недостоверной по

высоте модели из-за ее гладкости, и в местах разрыва первых производных (на резких перегибах рельефа) значения выходят за диапазон сечения. В алгоритме, предложенном С.М. Кошелем, эти недостатки устранены. Особенно важным представляется и то, что данный метод позволяет создавать ЦМР для любых территорий, в том числе с небольшим перепадом высот, что как раз актуально для Матыро-Воронежского междуречья. Первым делом необходимо подготовить исходные данные для анализа, поскольку горизонтали должны быть замкнутыми, либо их начало и конец должны располагаться вне рабочей области. Суть алгоритма состоит в вычислении расстояний до ближайших изолиний, имеющих разные высоты, после чего производится линейная интерполяция. При таком подходе значения высот, расположенных в пределах замкнутой горизонтали одного уровня, определяются верно. Алгоритм подразумевает 2 этапа: сначала происходит определение пересечений изолиний с ребрами сетки, а затем рассчитывается расстояние до пары ближайших изолиний от узлов, не помеченных на первом этапе. После выполнения серии итераций узлы сетки получают значение расстояний до ближайших изолиний и значения их уровней. Важным достоинством является то, что возможно проводить большое количество изолиний через ячейку, поскольку метод работает с векторными данными [24, 61].

На основании созданной ЦМР становится возможным расчет серии морфометрических величин (МВ) – производных характеристик рельефа, необходимых для дальнейшего качественного и количественного анализа. Они позволяют описать разные типы ландшафтных структур [26, 39]: геостационарной (кривизна поверхности, расстояние до водотоков, расчлененность территории), геоциркуляционной (степень увлажнения, латеральный перенос вещества и эрозионный потенциал) и биоциркуляционной (характеристики перераспределения тепла – экспозиция, крутизна и др.). Базой при расчете МВ выступает предположение, согласно которому показатели рассчитываются с использованием окрестности конкретной точки. Здесь используется скользящее окно, чаще всего размером 3×3 пиксела, движущееся от верхнего левого до нижнего правого угла растра, в котором для каждой ячейки применяется одна и та же формула. Некоторые простые морфометрические показатели (крутизна, уклон, кривизны, длина склонов, площадь водосбора) являются первыми производными от значений высот

местности. Другие, более комплексные (TPI, TWI, LS фактор, радиация), в свою очередь используют 2 и более первичных величин [68, 71, 78].

Одной из характеристик, важных для изучения водно-миграционных особенностей, является модель перераспределенного слоя осадков SIMWE (SIMulated Water Erosion) [66, 69]. Гидрологический компонент SIMWE описывается с помощью уравнений мелкой воды (линейные уравнения Сен-Венана), применимые при условии, что глубина понижений значительно уступает горизонтальным размерам [56]:

$$\frac{\partial h(r,t)}{\partial t} = i_e(r,t) - \nabla \cdot q(r,t),$$

Где $r = (x,y)$ – координаты (м), t – время (сек), $h(r,t)$ – глубина поверхностного стока (м), $i_e(r,t)$ – избыточное количество осадков (м/с, с вычетом расходов на инфильтрацию и поглощение растениями), $q(r,t)$ – расход воды на единицу ширины (м²/с).

Модель основана на методе Монте-Карло по линиям тока (path sampling method – PSM), который отличается своей надежностью, что позволяет решать уравнения Сен-Венана для сложных случаев (в том числе, при разрывах в коэффициентах дифференциальных операторов как при наличии крутых склонов). При использовании других методов существенная часть усилий и времени тратится на предварительную подготовку данных во избежание вычислительных ошибок, однако в случае PSM это время сведено к минимуму. Как правило, неточности связаны с некоторыми исходными параметрами: высокое разрешение, резкие изменения в рельефе, наличие антропогенных нарушений (трубы, дренажные каналы) и плоский характер территории и наличие западин. Многие перечисленные факторы характерны и для ключевого участка, поэтому особенно важно использовать надежный метод моделирования [56].

Западины и плоские участки осложняют моделирование, поскольку в их пределах направление водного потока не определено. В моделях, которые основаны на решении уравнений кинематической волны, необходимо изменять высотные значения и создавать искусственный рельеф с четко определенными градиентами, что, безусловно, сильно искажает результаты. Однако при использовании

специально разработанного модуля *r.sim.water* в среде программирования «GRASS» вода заполняет замкнутые понижения и распределяется по поверхности в наиболее вероятном направлении. Для расчета необходима абсолютная высота с ЦМР и ее производные: плановая и профильная кривизны. Кроме того, дополнительно задаются значения осадков, инфильтрации, коэффициенты шероховатости и диффузии воды. Алгоритм основан на моделировании перераспределения избыточной влаги, оставшейся после того, как почва становится насыщенной выпавшими осадками. SIMWE отображает не только речную сеть и каналы, но и территории, которые могут быть подвержены затоплению [56].

Линейный дискриминантный анализ (ЛДА) – метод статистического анализа, позволяющий принимать решения о том, какие переменные способны относить данные к различным группам. В процессе вычисления определяется, существуют ли отличия групп по среднему значению переменной или их сочетаний. Затем эта переменная используется для других членов с целью предсказания их попадания в определенную группу. ЛДА относится к методам классификации с обучением, подразумевающей наличие некоторых эталонов со свойственными им значениями и элементами, а также измеренных исследователем характеристик для иных элементов, не принадлежащих определенному классу. Переменные делятся на две группы: независимые - такие переменные, значениями которых можно управлять, т.е. они являются независимыми от свойств объектов эксперимента и от реакции (климат, рельеф). В свою очередь зависимые переменные предполагают отклик на условия эксперимента или действия объекта, их можно только регистрировать либо измерять (типы почв) [32].

В процессе ЛДА происходит построение плоскости размером $k-1$, где k - число классов. Данная плоскость делит все пространство на k подобластей так, что элементы, принадлежащие, каждому классу, могли относиться только к одной подобласти. С точки зрения вычислений, ЛДА близок к дисперсионному анализу, оценивающий значимость различий между средними [32].

Для классификации и составление моделей регрессии применяют метод *ансамбля дерева решений* (*Random forest*). Алгоритм состоит из нескольких этапов: сначала генерируется случайная подвыборка с повторениями из обучающей выборки,

образцы из которой на следующем этапе будут классифицированы решающим деревом (на «ветках» записаны атрибуты, на «листьях»- значения целевой функции, измененной в ходе движения от корня). В ходе этого этапа происходит выбор признаков, отвечающих за разбиения на классы. Работа продолжается до полного исчерпания подвыборки, а классификация осуществляется за счет голосования каждого «дерева» за отдельный класс. Использование большого количества «деревьев» позволяет получить хорошую суммарную точность, которая не может быть достигнута при учете только одного из них, поэтому для данного метода точность зависит от количества итераций. К достоинствам метода ансамбля деревьев решений является высокая скорость выполнения итераций, нечувствительность к шумам и выбросам, высокая точность результатов, хорошие оценки точности и корреляции и обработка как дискретных, так и континуальных данных [49].

Логистическая регрессия является статистической моделью, используемой для предсказания вероятности некоторого события путем сравнения значений с логистической кривой. Этот метод является частным случаем линейного классификатора, суть которого заключается в разделении признакового пространства гиперплоскостью – линейным дискриминантом Фишера [52, 53], в каждом из двух отделов которого прогнозируется значение класса (рис. 1). В случае большого количества классов разделяющая поверхность является кусочно-линейной. Преимущество метода заключается в том, что возможно спрогнозировать вероятность отнесения примера к классу, и конечный результат будет находиться в интервале $[0,1]$. В процессе обучения модели, в котором происходит минимизация логистической функции – главная задача логистической регрессии - возникает понятие отступа классификации (M, margin): $M(\vec{x}_i) = y_i \vec{\omega}^T \vec{x}_i$. Если его значение больше нуля на объекте \vec{x}_i , значит, модель предсказала правильный класс. Если значение $M(\vec{x}_i)$ большое и положительное, то класс определен верно; если большое и отрицательное, то была допущена ошибка. При небольшом значении знак определяет правильность классификации. Таким образом, происходит максимизация среднего значения функции с помощью принципа максимального правдоподобия [81, 82].

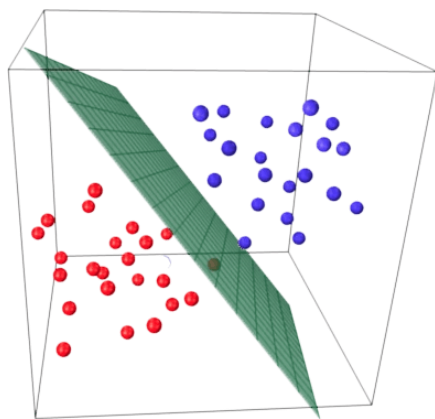


Рис. 1. Разбиение признакового пространства гиперплоскостью [82]

Еще один актуальный алгоритм – *метод опорных векторов* (support vector machine, SVM), который изначально применялся для задач бинарной классификации, но сейчас уже может применяться для мультиклассификации. Как и в случае логистической регрессии, рассматриваются гиперплоскости и выбираются те из них, которые разделяют пространство на классы наилучшим образом. Векторы, расположенные ближе всего к разделяющей гиперплоскости, носят название опорных. Классифицирующая функция имеет вид $F(x) = \text{sign}((w, x) + b)$, где w – нормальный вектор к разделяющей плоскости, b – дополнительный параметр, $(,)$ – скалярное произведение. При значении $F(x)=1$ классифицируемые объекты попадают в один класс, при $F(x)=-1$ – в другой. Чтобы получить итоговый достоверный результат, необходимо добиться таких значений b и w , которые бы делали максимальным расстояние между классами [81].

Поскольку в случае большого количества классов границы не являются линейными, возникает необходимость использования специальных функций – ядер (kernel), из которых чаще всего используются радиальные базисные функции, полиномиальные или сигмоиды. Основная идея заключается в том, что при переходе в пространство большей размерности наша выборка станет линейно разделимой, а ядра заменяют собой скалярное произведение [81].

Методами геоинформатики производится сопоставление набора морфометрических величин элемента цифровой модели рельефа для каждой точки почвенного описания. Поиск статистических закономерностей между морфометрическими величинами и таксонами почв проводился несколькими методами и результатом

описанного моделирования является доленое участие каждого из таксонов почвы в пикселе размером 25x25 м и карта структур почвенного покрова, соответствующая типам местности. В качестве меры доленого участия использованы постериорные вероятности почв.

Глава 2. Физико-географическая характеристика Матыро-Воронежского междуречья (МВМ)

Ключевой участок расположен на востоке Тамбовской области в пределах Окско-Донской низменности (рис. 2).

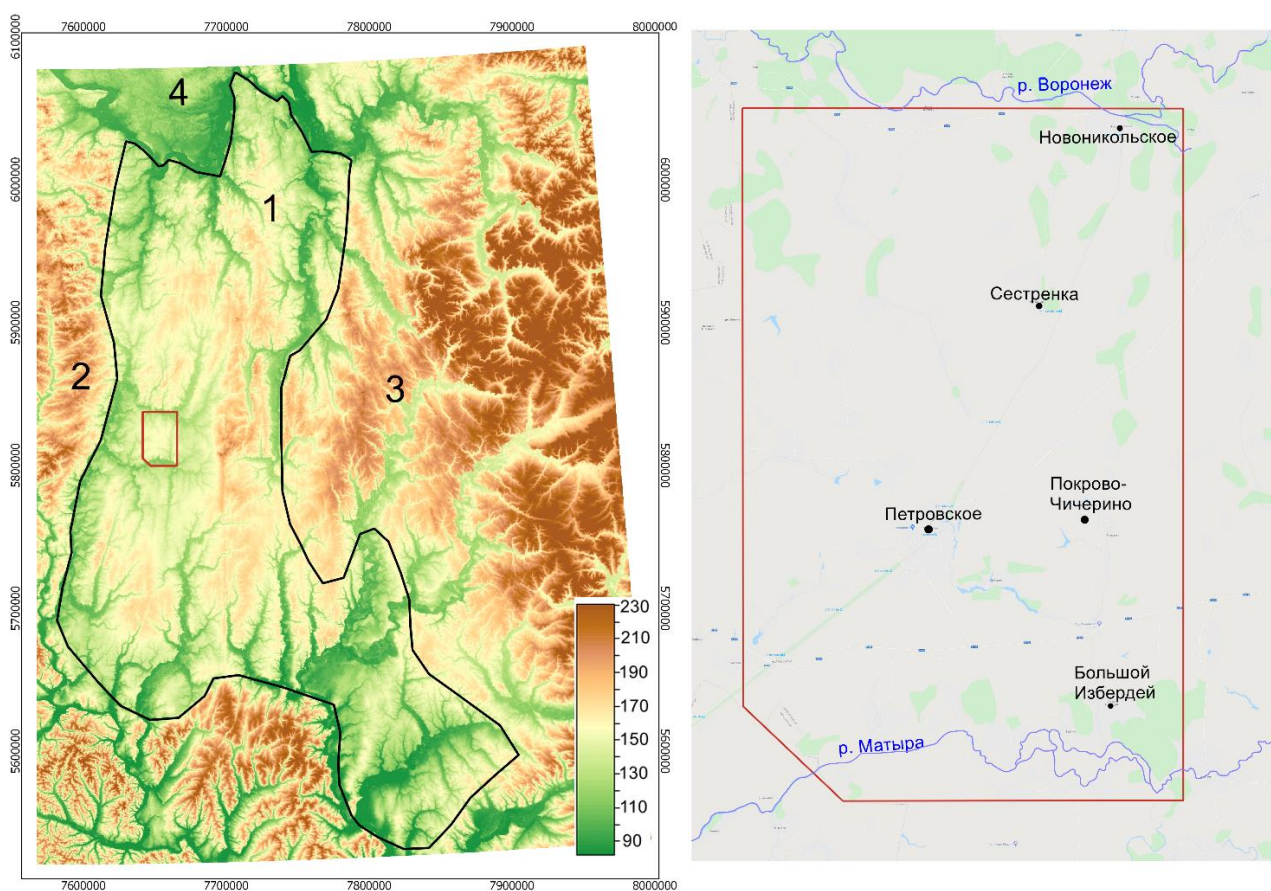


Рис. 2. Положение ключевого участка на Окско-Донской низменности (1). Цифрами обозначены: 2 – Среднерусская возвышенность, 3 – Приволжская возвышенность, 4 – Мещёрская низменность

2.1 Геолого-геоморфологическое строение.

Окско-Донская низменность в палеогене представляла собой приподнятую, по сравнению с современными Приволжской и Среднерусской возвышенностями, равнину, которая в миоцене подверглась тектоническому опусканию с накоплением мощных

толщ рыхлых отложений и перестройкой речной сети. В это время на территории господствовал мягкий влажный климат с повсеместным распространением вечнозеленых хвойных и широколиственных лесов. Позже, в плиоцене, климат меняется в сторону иссушения и понижения температуры, что приводит к развитию холодоустойчивых хвойных пород в сочетании с болотами, степными и луговыми комплексами. Четвертичный период характеризуется тектонической активностью с сочетанием мощных поднятий и последующих опусканий. Покровные оледенения не обошли Окско-Донскую низменность стороной: на междуречьях залегает валунно-суглинистая морена донского возраста (с 2-3 метров), перекрытая толщей флювиогляциальных (в результате таяния московского ледника) и аллювиальных отложений. Во время оледенений климат отличался сухостью и холодом, в то время как в межледниковья – обилием тепла и увлажнения. Современный рельеф сформирован в результате тектонических поднятий, в результате которых углублялись речные долины и формировались надпойменные террасы [28, 35].

Основные междуречные поверхности Окско-Донской низменности (в т.ч. Матыро-Воронежское междуречье) сформированы в неогеновое время и представлены плиоценовыми песками, в верхней части перекрытыми глинами. В долинах рр. Матыра и Воронеж вскрываются отложения мела: песчаники, гальки, фосфориты и кремни, в основании с галькой фосфоритов и кремней. Они сочетаются с более ранними песками с прослоями песчаников валанжинского яруса, а также с переслаивающимися песками, глинами и сидеритовыми песчаниками с галькой фосфоритов в основании. На севере междуречья вскрываются девонские известняки тонкоплитчатые, доломиты и мергели; на западе они сменяются доломитизированными известняками, занимающими довольно большую площадь территории. В долине р. Матыра встречаются миоцен-нижнеплиоценовые глины, алевриты и пески, переходящие к западу в пески с прослоями глин. Перечисленные породы практически повсеместно перекрыты чехлом четвертичных отложений, в том числе покровных суглинков мощностью до 3 м. Обнажения коренных пород встречаются редко и приурочены в основном к речным долинам и крутым склонам [75]. Характерной чертой геологического строения является ергенинская толща, заполняющая древние речные долины. Она состоит из крупно- и среднезернистых песков, переслаивающихся с глинами [17].

Исследуемая территория, согласно карте четвертичных отложений [75], представляет собой аллювиально-флювиогляциальную равнину с серией врезанных долин и комплексом надпойменных террас (см. рис. 3). Четвертичные покровы на фоновых основных поверхностях представлены аллювиально-флювиогляциальными суглинками, супесями и песками. В долине р. Матыры и ее притоков вскрывается морена днепровской стадии московского оледенения из сочетания суглинков, глин и реже песков. Ближе к реке вскрываются более древние водноледниковые пески (реже суглинки и глины) времени наступания днепровского языка. Местами проявляются пески и суглинки 2 и 1 НПТ, которые переходят в отложения современных пойм. В бассейне р. Воронеж картина несколько другая: здесь хорошо выражены все НПТ, - сложенные песками, супесями и суглинками, в то время как ледниковые отложения распространены на весьма ограниченной площади. Современная пойма р. Воронеж и ее притоков состоит из супесей, песков и суглинков. По данным Г.И. Раскатова [34], было всего 3 эрозионно-аккумулятивных цикла, в результате которых сформировалось I, II и III НПТ, а то, что в настоящее время мы принимаем за междуречье, представляет собой флювиогляциальную равнину. Повсеместно, за исключением поймы, I-III НПТ и коренных отложений, залегает толща лессовидных покровных суглинков.

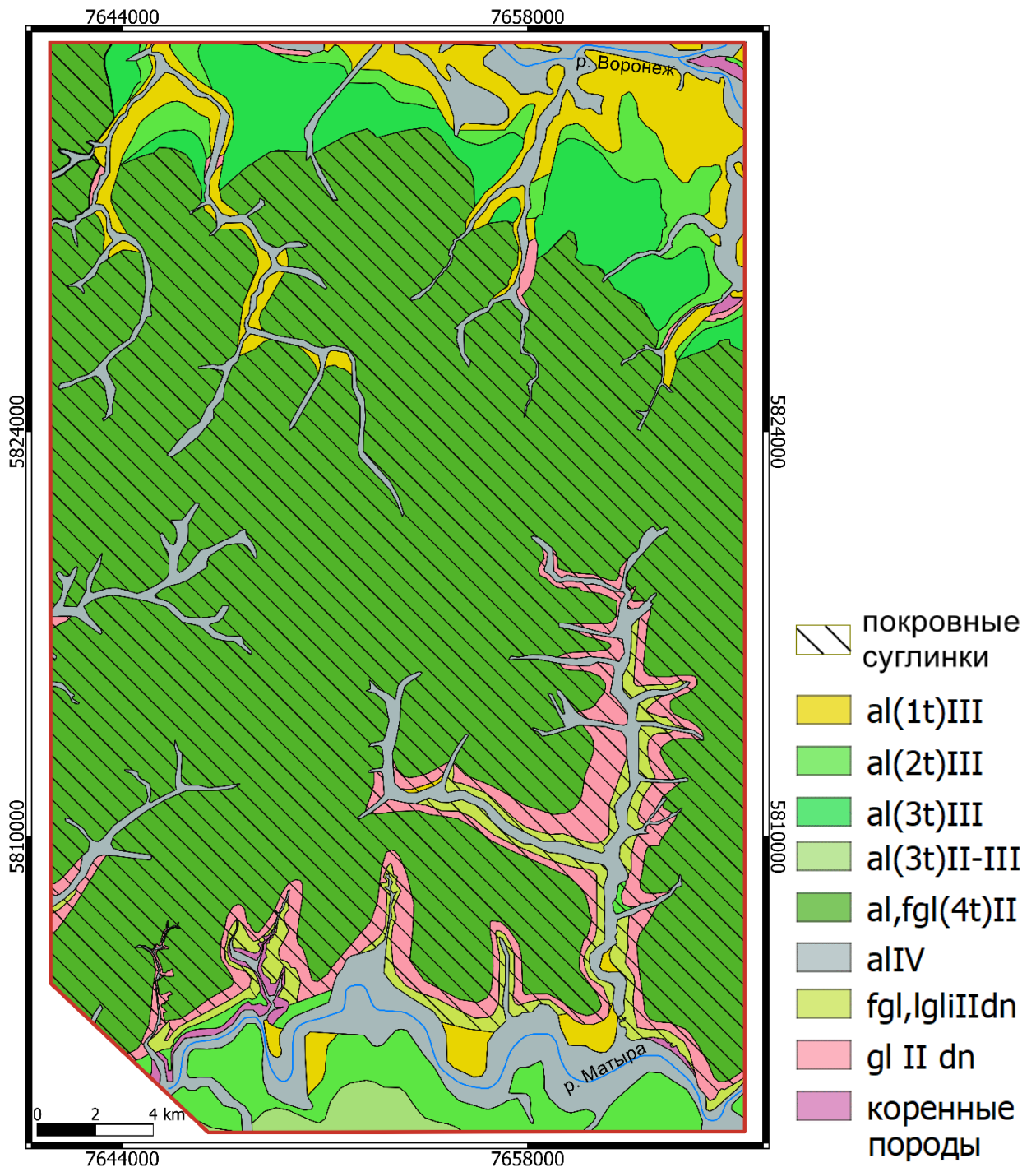


Рис. 3. Карта четвертичных отложений

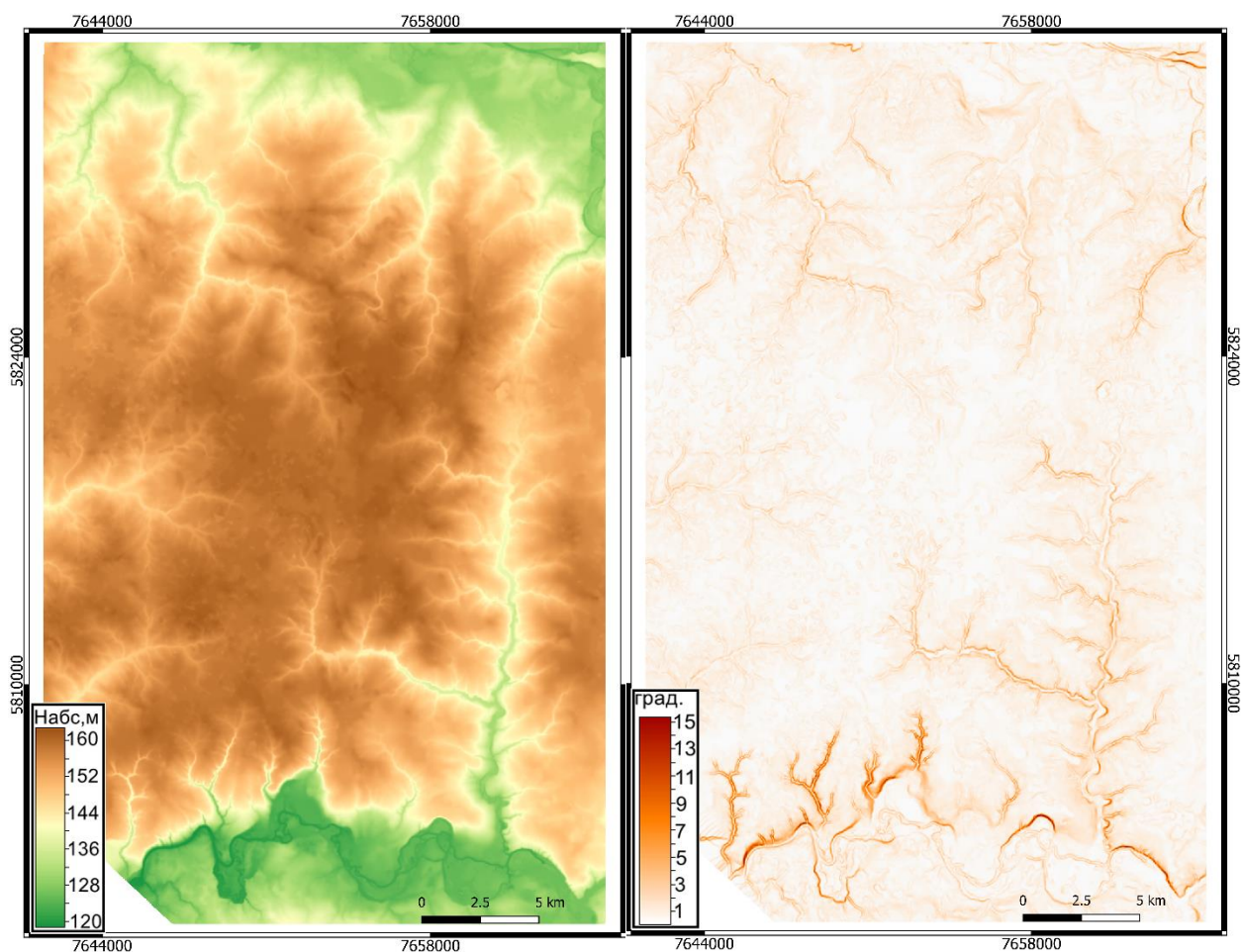


Рис. 4. Цифровая модель рельефа МВМ (слева) и крутизна поверхности (справа)

Абсолютные высоты Матыро-Воронежского междуречья колеблются от 110 до 160 м (рис. 4). Низшие отметки высот характерны для долин рр. Матыра и Воронеж, а наибольшие тяготеют к плакорам, возвышающимся среди овражно-балочной сети. В свою очередь плакоры и части недренируемого междуречья в пределах МВМ осложнены серией западин. Исследователи [28, 43] различают два аспекта их формирования: генезис первичных неровностей рельефа и вторичные наложенные процессы. Относительно первого существует несколько гипотез (результат оттаивания мерзлых пород в конце валдайской эпохи, деятельности роющих животных, механического воздействия талых вод, деградации стариц и озер при врезании речной сети и др.), в то время как вторичные процессы, приведшие к окончательному формированию западин, обусловлены исключительно суффозией. История развития территории и характер отложений определили современный рельеф и его свойства: крутизна на более чем 87% площади не превышает 1.2° (см. табл. 2.1). Согласно классификации эрозионных районов Милькова [28] исследуемое междуречье относится

к типу слаборасчлененных древней эрозией, малоовражных районов с наличием широких прибалочных и придолинных склонов и присутствием коротких склоновых оврагов.

На центральных, абсолютно плоских, участках междуречья перенос материала затруднен, в связи с чем создаются условия для застоя влаги и формирования почв гидроморфного ряда. Суффозионные западины в еще большей степени способствуют переувлажнению и ограничениям в использовании. По мере приближения к овражно-балочной сети крутизна поверхности закономерно увеличивается, достигая максимальных значений на склонах речных долин и эрозионной сети, где выходят коренные породы и обнажается морена.

Таблица № 1

Распределение значений крутизны.
Составлено на основе ЦМР

Крутизна, °	Доля, %
0 – 0.4	38.89
0.4 – 0.8	33.20
0.8 – 1.2	15.42
1.2 – 1.6	5.56
1.6 – 2.0	2.60
2 – 2.4	1.37
2.4 – 2.8	0.79
2.8 – 3.2	0.54
3.2 – 3.6	0.37
3.6 – 4.0	0.26
4 – 6	0.62
6 – 10	0.33
10 – 15	0.05
15 – 20	0.00
20 – 35	0.00

Элементарные поверхности мезорельефа (см. рис. 5) получены путем комбинации значений крутизны и индекса конвергенции, положительные значения которого отвечают за вогнутые формы, отрицательные – за выпуклые. Из карты видно, что внутренняя часть междуречья представлена сочетанием выпуклых и вогнутых элементов крутизной 0 – 0.4°, которая возрастает до 0.4 – 0.8° вблизи оврагов и

переходит в вогнутые элементы крутизной в основном до $6 - 8^\circ$ на склонах в южной части. Кроме того, в центре наблюдаются вогнутые замкнутые кольцеобразные структуры – западины, типичные для этого междуречья. Обширные террасы имеют выпуклый профиль и крутизну до 1.6° , а многочисленные ложбины на склонах – вогнутый с крутизной от 0.4 до 2° . Карта наглядно демонстрирует, какие участки рассеивают сток, а в каких происходит его концентрация, что непосредственным образом влияет на функционирование ландшафтов.

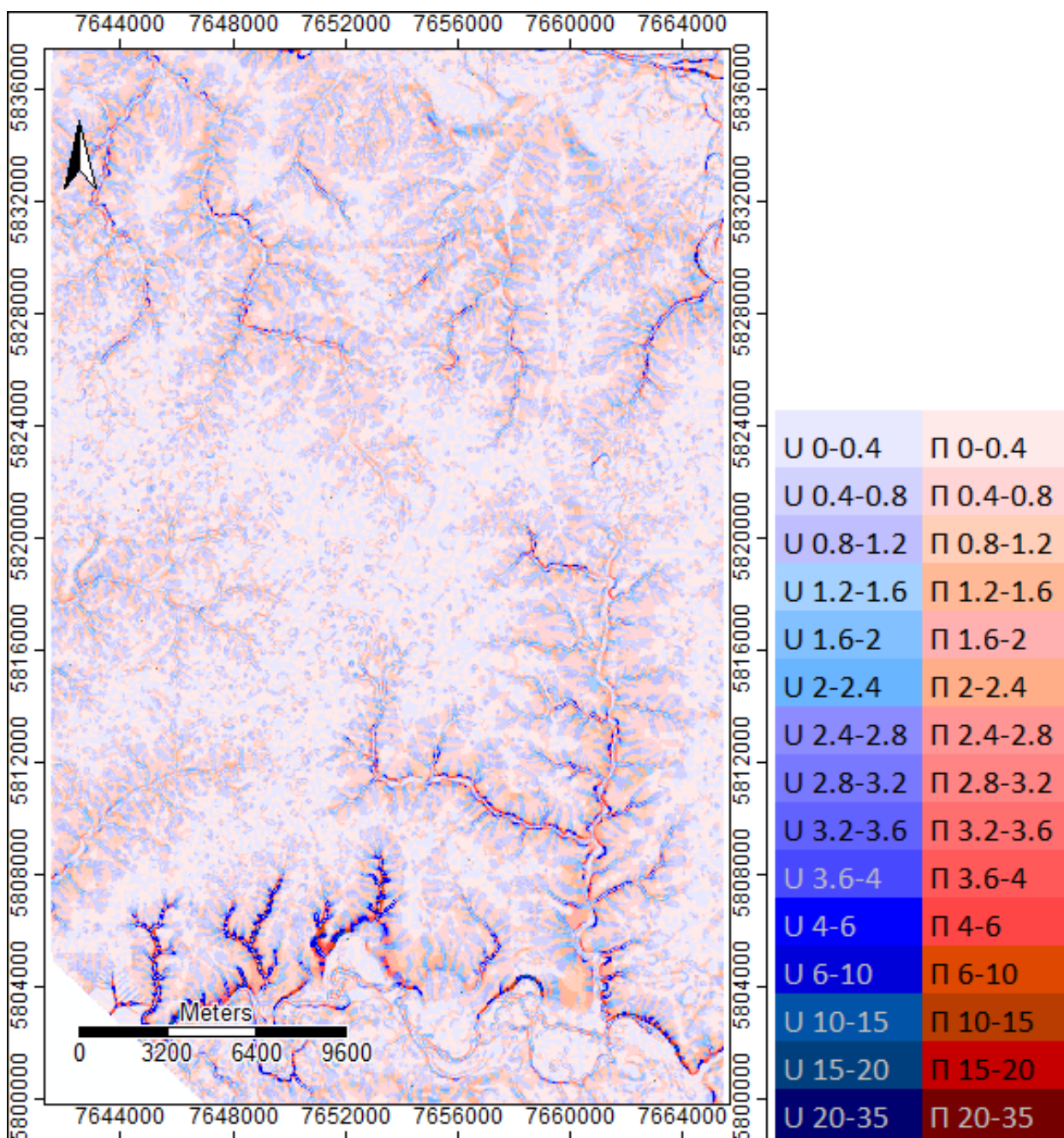


Рис. 5. Типы элементарных поверхностей мезорельефа. U – вогнутые, П – выпуклые. Цифрами обозначена крутизна в градусах

2.2 Климатическая характеристика.

Таблица № 2

Агроклиматические показатели МВМ по материалам портала ЕСMWF

Показатели	Значение
Период с температурами выше +10°C	конец апреля- начало мая до 20-х чисел сентября
Период с температурами выше +15°C	Конец мая – конец августа
Сумма температур выше +10°C	2720 – 2800°C
Сумма температур выше +15°C	2100 – 2200°C
Коэффициент сухости М.И. Будыко	1.08 – 1.14
Коэффициент увлажнения Н.Н. Иванова	0.68 – 0.76
Суммарная солнечная радиация (2018 г.), кВт/м ²	1515 - 1713

[79]

Климат Матыро-Воронежского междуречья, согласно классификации Кёппена, относится к группе континентального с теплым летом и без сухого сезона. Последняя характеристика, несомненно, отражается в функционировании ландшафтов и влияет на формирование почв гидроморфного ряда. Среднегодовые температуры положительные и составляют порядка +5.4 – +5.7°C, среднегодовое количество осадков находится в пределах 545 мм (см. рис. 6). Самый теплый месяц года (+19.7°C), июль, отличается максимумом выпадающих осадков – 77-80 мм. В это время происходит восполнение запасов почвенной влаги и наполнение водоемов. Самым сухим месяцем является март (около 27 мм), затем количество осадков закономерно увеличивается к июлю. Наиболее низкие температуры характерны для января и составляют в среднем -9.6 – -10°C. Снежный покров устанавливается после 23 октября и может сохраняться до поздней весны, вплоть до 31 мая, как это было зафиксировано в 2012 году. Его характерная высота составляет порядка 26 см [73, 76].

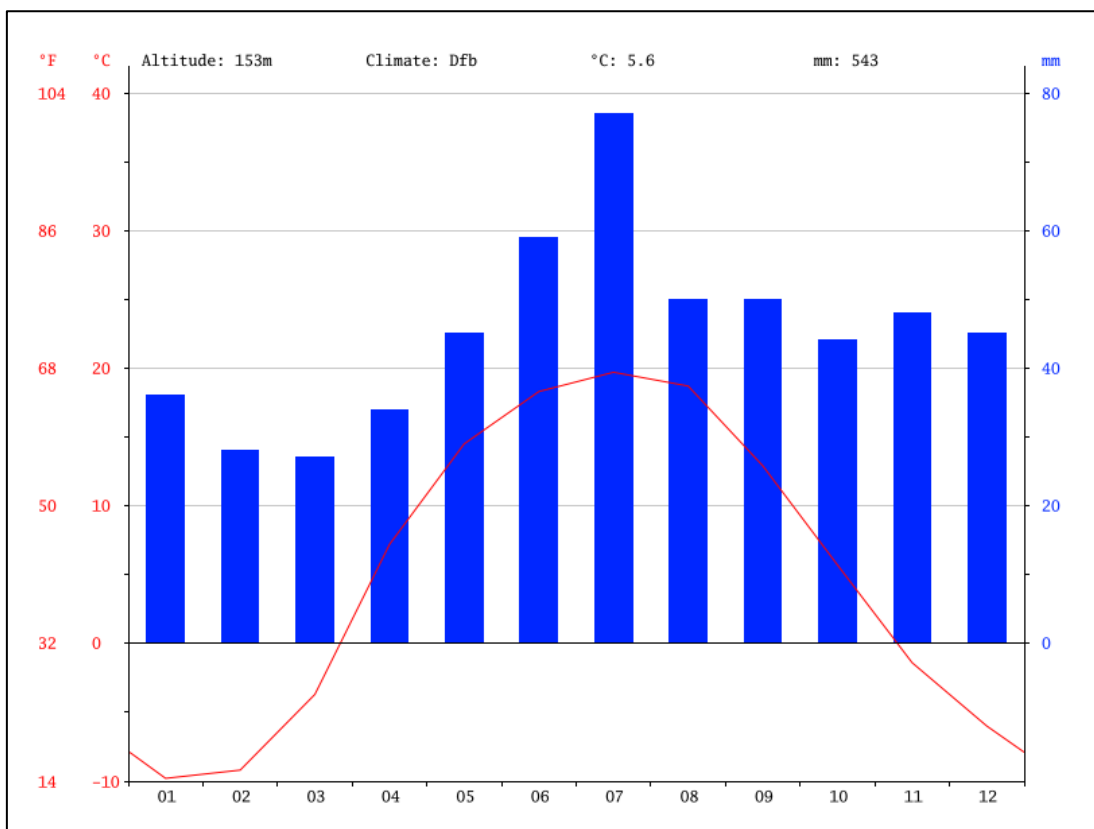


Рис. 6. Климатический график с. Петровское, Тамбовская область [73].

2.3 Морфологическая структура и хозяйственное использование типов местности МВМ.

Матыро-Воронежское междуречье, согласно учению о типах местности Ф.Н. Милькова [28, 29], охватывает по большей части междуречный недренированный тип местности. Его характерными особенностями является замедленный дренаж ввиду небольших уклонов поверхности, наличие водоупора из средних и тяжелых суглинков (местами глин), близкое залегание грунтовых вод (3 – 6 м). Участок расположен в Среднерусской почвенно-экологической провинции, где коренная растительность представлена луговыми злаково-разнотравными и разнотравно-злаковыми степями в сочетании с дубовыми лесами, однако она сильно трансформирована в результате антропогенной деятельности. Фоновыми почвами являются лугово-черноземные, которые формируются из-за замедленного оттока и являются полугидроморфными вариантами черноземов. В целом, для почвенно-растительного покрова характерна комплексность ввиду развития западин и специфического водного режима.

Большая часть междуречья занята пашней, где основными выращиваемыми культурами являются зерновые: пшеница (озимая и яровая), ячмень, кукуруза, соя. Также значительные площади отведены под подсолнечник, сахарную свеклу, рапс и люцерну. Ограничения в использовании земель связаны с повышенным увлажнением в некоторых позициях рельефа, и это негативно отражается на урожайности. Некоторые посевы вымокают во влажные годы, что приводит к серьезным экономическим и производственным потерям. К сожалению, в настоящее время борьба с переувлажнением практически не ведется, и участки, которые потенциально могут оказаться гидроморфными в конкретный год, засеваются. Однако в сухие годы, когда весенняя влагозарядка почв оказывается недостаточной, некоторые хозяйства сталкиваются с противоположной проблемой – нехваткой влаги для культур, которая решается с помощью систем орошения и, в том числе, ирригационных каналов.

В последние 20 лет отмечается увеличение количества осадков как в вегетационный период, так и в течение года на территории лесостепной и северной части степной зоны. Вместе с тем, увеличение антропогенной нагрузки (воздействие тяжелой техники) и строительство ирригационных каналов приводит, с одной стороны к уплотнению пахотного горизонта, а с другой – к подъему грунтовых вод и формированию переувлажненных земель, в том числе замене автоморфных почв почвами гидроморфного ряда [15]. Рассмотрим подробнее их особенности.

Фоновыми почвами недренированного типа местности, согласно данным почвенного обследования 1988 года, произведенного сотрудниками Воронежского университета, а также по собственным наблюдениям, являются **лугово-черноземные** тяжелосуглинистые (Лч). Они представляют собой полугидроморфные аналоги черноземов, формируясь в условиях плоских недренируемых или слабодренируемых междуречий, подстилаемых мореной, с залеганием грунтовых вод на глубине 3 – 6 м. Кроме того, они встречаются в замкнутых понижениях на надпойменных террасах и у подножий склонов. Типичный профиль состоит из горизонтов $A \rightarrow AB \rightarrow Bca(q) \rightarrow Cca$. Свидетельства частого переувлажнения – обильное количество марганцевых примазок и конкреций в профиле, начиная с переходных горизонтов АВ: АВса, АВqса, АВq (по данным

собранных полевых материалов минимальная глубина их встречаемости в пределах МВМ составляет 31 см). В генетических горизонтах, особенно в А, присутствуют следы потечности гумуса. На таких почвах коренная растительность представлена разнотравными лугово-степными сообществами или разреженными лиственными лесами [72].

Луговато-черноземные почвы (Лч1) – подтип лугово-черноземных – образуются в результате периодически-повышенного поверхностного увлажнения. Они располагаются в депрессиях, у подножий склонов и на надпойменных террасах, где возможно задержание влаги. Помимо повышенного содержания гумуса наблюдается бóльшая ретечность его окраски в иллювиальном горизонте и присутствие слабовыраженных форм оглеения (примазки, ржаво-бурые жилки), которые при уменьшении увлажнения могут исчезать. Строение почвенного профиля такое же, как у Чл2, различия проявляются в глубине залегания грунтовых вод. На местности такие почвы дешифрируются более развитой густой растительностью по сравнению с черноземами автономных позиций [20].

Следующими по частоте встречаемости следуют **черноземно-луговые** тяжелосуглинистые (Чл), которые относят к категории гидроморфных, с грунтовыми водами, залегающими на 1-3 м от поверхности. Типичные местоположения – западины и понижения разного масштаба. Они занимают промежуточное положение между лугово-черноземными и луговыми затапливаемыми почвами; основное промывание профиля происходит в весенний период и частично летом. Дополнительная влага в них сохраняется за счет замедленного дренажа ввиду плоского рельефа и тяжелого механического состава, а также из-за соседства с более гидроморфными местообитаниями (западинами). Кроме того, в отличие от лугово-черноземных почв, в которых влияние грунтовых вод проявляется в нижней части профиля, в черноземно-луговых воздействие оказывается на весь профиль, и испарение грунтовых вод также проходит через все горизонты. Таким образом, необходимые условия для их формирования – наличие водоупора на небольшой глубине и западин, плоский рельеф, повышенное увлажнение, травяная растительность. В общем случае профиль состоит из следующих горизонтов: А → АВ → Вg. Характерна карбонатность по всему

профилю в виде журавчиков и конкреций, присутствие железистых конкреций и гумусовых потеков; оглеен только нижний горизонт, что связывают с низкой подвижностью органического вещества [36]. В сочетании с черноземно-луговыми часто в более пониженных позициях встречаются **черноземно-влажнoluговые почвы** (Члвл). Грунтовые воды в них находятся на глубине 1 – 1.5 м в течение всего периода вегетации, а поверхностное затопление весенними водами продолжается до 3 недель. Строение почвенного профиля схоже с Чл, но признаки оглеения (сизые и бурые пятна оглеения, железомарганцевые конкреции) наблюдаются уже в переходном горизонте: $A \rightarrow AB_g \rightarrow Bg \rightarrow C_g$. При распашке происходит ухудшение структуры пахотного горизонта и водно-воздушного режима, однако сам по себе гумусовый горизонт обладает благоприятными свойствами для произрастания культур, наиболее оптимальными из которых являются злаки [3, 35].

В пределах плоского междуречья активное развитие получили блюдцеобразные западины и небольшие понижения с луговой и кустарниковой растительностью (осиновые кусты). Их формирование связано с суффозионными процессами и близким залеганием грунтовых вод. Для них характерен особый тип почв – **солоди** (Сд), который образуется под действием сезонного поверхностного переувлажнения и подтягивания грунтовых вод. Профиль солодей сильно дифференцирован, представлен следующим набором генетических горизонтов: $Ad \rightarrow A \rightarrow El(g) \rightarrow ElB(g) \rightarrow V_{ca,t} \rightarrow C_{ca}$. Элювиальный горизонт белесого цвета, с комковато-плитчатой структурой (бесструктурный) и возможным наличием ржавым пятен железа. Ниже залегает горизонт с обилием железных и гумусовых примазок и конкреций, которые вымываются из верхних частей профиля; ниже он переходит в текстурный горизонт $V_{ca,t}$, характеризующийся тяжелым механическим составом, темно-бурой окраской и повышенной плотностью, также обогащенный железогумусовыми пятнами и потеками, железомарганцевыми конкрециями. Хозяйственное использование солодей затруднено ввиду неблагоприятного водного и химического режима, а также их положения в понижениях рельефа, поэтому на них сохраняется луговая и древесная растительность [72, 77].

Помимо солодей, в западинах формируются **серые лесные поверхностно-глеево-элювиальные** почвы (Лпгэ), в которых грунтовые воды должны залегать на глубине

1 – 3 м. После весеннего снеготаяния и в конце осени западины заполняются водой, а в засушливый летний период пересыхают. Для них характерен промывной тип водного режима и выраженный белесый горизонт, формирующийся в результате чередования условий избыточного поверхностного увлажнения за счет миграции влаги с окружающих пространств и обсыхания западин. В результате выносятся тонкие почвенные частицы, что вместе с периодически возникающими восстановительными условиями приводят к дифференциации профиля, осветлению гумусового горизонта и сокращению запасов гумуса. Профиль Лпгэ представлен горизонтами $A_{1g} \rightarrow A_{2g} \rightarrow V_{1t,g} \rightarrow V_t \rightarrow VC_g$. Несмотря на неблагоприятный водный режим и низкое плодородие, неглубокие западины с Лпгэ распаиваются. Однако посевы в них угнетены и подвергаются вымоканию [3, 28].

Почвы болотного ряда – **лугово-болотные** (Бл) и **болотные** (Бт) индицируются в более глубоких западинах с УГВ на глубине 1 – 2 м от поверхности, в которых практически постоянно сохраняется влага. Набор горизонтов имеет следующий состав: $A_v \rightarrow A_{1g} \rightarrow V_g \rightarrow C$. Для них типичны луговые влаголюбивые виды: щучка, мятлик болотный, некоторые осоки, вейник седеющий, тростник (во влажные периоды) и др. Их использование в хозяйстве затруднено ввиду плохих водно-воздушных свойств и высокому УГВ [72].

Светло-серые лесные почвы (Л1) сформированы на песках и супесях НПТ и характеризуются светло-серой окраской гумусового горизонта и кремнеземистой присыпкой в подпахотном горизонте. В них усилен дерновый и ослаблен подзолистый процесс. Типичный профиль состоит из горизонтов: $A_0 \rightarrow A_1 \rightarrow A_1A_2 \rightarrow A_2V \rightarrow V \rightarrow C$. Характерной чертой служит облегченный гранулометрический состав и резкое уменьшение содержание гумуса с глубиной. На почвах террас произрастают сосновые леса, частично их используют под посевы с/х культур, однако для получения устойчивых урожаев они нуждаются в дополнительном внесении удобрений и извести [72].

Черноземы выщелоченные (Чв) и **типичные** (Чт) не получают в пределах МВМ большого развития и приурочены к наиболее дренированным выпуклым участкам междуречья среди овражно-балочного комплекса. Узость их ареала обусловлена историей развития, поскольку во время таяния ледника потоки талых вод

обусловили гидроморфный характер почвообразования, который с течением времени и врезанием рек заменяется автоморфным. Несмотря на постепенную эволюцию луговых почв в черноземы, в последних все же сохраняются черты повышенного увлажнения. Чт, для которых характерно формирование темного гумусового и иллювиального горизонтов и максимальное развитие профиля с интенсивным накоплением гумуса, отличаются от Чв, приуроченных к небольшим понижениям на плакорах. В них происходит вынос карбонатов и осветление горизонтов в нижних частях, наблюдается языковатость и растечность окраски в результате периодического промывания [20, 28].

Почвы овражно-балочного комплекса (ОБК) представлены различными типами и подтипами с наложенными процессами смыва и намыва, аккумуляции материала с вышележащих позиций (в основном с распахиваемых полей): смытые, намывные, переотложенные и малоразвитые категории. В днищах к зональным процессам почвообразования прибавляются делювиальный и аллювиальный, в то время как на склонах – процессы денудации и эрозии. В таких почвах возрастает роль почвообразующих пород и интенсивности экзогенных процессов. Намывные почвы характеризуются увеличенной мощностью горизонтов и оструктуренностью, в переотложенных к данным признакам добавляется слоистость. Для предотвращения деградации земель целесообразно по бровкам сохранять естественную растительность либо закреплять склоны искусственно [10].

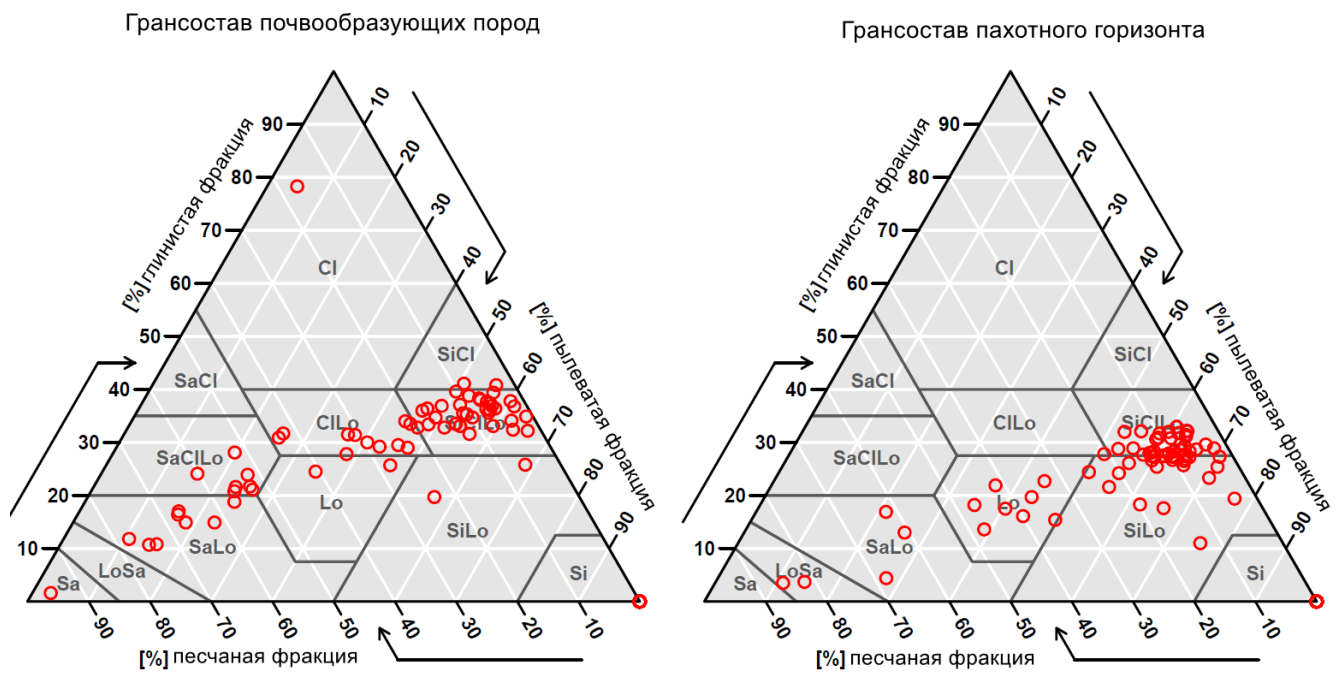


Рис. 7. Гранулометрический состав почвообразующих пород и пахотного горизонта

Гранулометрический состав почвообразующих пород и пахотного горизонта (рис. 7) слабо варьирует: основной массив точек свидетельствует о доминировании пылевой фракции (60 – 75%) и пониженном содержании песчаных частиц (10 – 40%); глинистая фракция составляет от 25 до 45%. Таким образом, основная доля классифицируется как пылеватый глинистый суглинок (SiClLo). В почвообразующих породах наблюдается несколько облегченный состав (SaClLo – опесчаненный глинистый суглинок, SaLo – опесчаненный суглинок) в отличие от пахотного горизонта (Lo – суглинок) из-за уплотнения последнего в результате распашки и наличия плаща покровных суглинков, залегающих на исходных супесях или песках.

Глава 3. Моделирование перераспределенного слоя осадков и почвенно-ландшафтных связей

Текущая работа подразумевала следующие этапы:

1. Построение ЦМР
2. Расчет морфометрических величин
3. Расчет перераспределенного слоя осадков
4. Подготовка обучающей выборки по материалам почвенных обследований

5. Построение региональной модели почвенно-ландшафтных связей разными статистическими методами
6. Составление карт структур почвенного покрова
7. Оценка точности моделирования

В условиях относительно однородных почвообразующих пород ведущим фактором дифференциации является рельеф, который выступает с одной стороны как фактор-ретранслятор свойств ландшафта и процессов, а с другой – как индикатор интенсивности этих процессов. Поэтому для создания модели почвенно-ландшафтных связей на первом этапе было необходимо *построить ЦМР* на основании серии крупномасштабных топографических карт. Они были привязаны в программе «Global mapper» по координатной сетке методом триангуляции, исключая искажения в каждой контрольной точке привязки. Был использован этот метод, поскольку точки распределялись по сетке карты равномерно с заданным шагом. Последующая оцифровка и простановка высот производились в ПО «Easy trace». Полученные в результате проведенных действий горизонтали были загружены в программу «Surfer», позволяющую создавать ЦМР по методу С.М. Кошеля (см. главу 1.3).

Важный следующий шаг – выбор размера пиксела и коэффициента экстраполяции. В качестве первого значения было принято разрешение 25×25 м, т.к. такой размер подходит для отображения мезоформ рельефа и групп среднемасштабных западин. Коэффициент экстраполяции (КЭ) может быть больше или равным нулю и отвечает за степень изменчивости значений высот в узлах сетки с одной ограничивающей изолинией. Как правило, эти узлы расположены рядом с экстремумами, а угол наклона между двумя ближайшими горизонталями умножается на заданный КЭ. При его значении, равном 0, полученная ЦМР будет характеризоваться плоскими положительными и отрицательными формами; при значениях от 0 до 1 пики будут сглажены, а котловины окажутся более мелкими (за счет уменьшения скорости изменения высоты между ближайшими горизонталями); а при значениях больше 1 будут сгенерированы более глубокие западины и высокие пики [83].

Чтобы подобрать оптимальное значение этого коэффициента был проведен корреляционный анализ в «RStudio» с помощью языка программирования R.

Изначально была создана выборка из 96 точек, расположенных внутри замкнутых западин или возвышений, для которых были известны высоты с карт. В программе «SAGA» им была присвоена пара прямоугольных координат для однозначного определения размещения в пространстве. Затем было создано 4 ЦМР с разными значениями КЭ: 0.5, 1, 1.5 и 2.

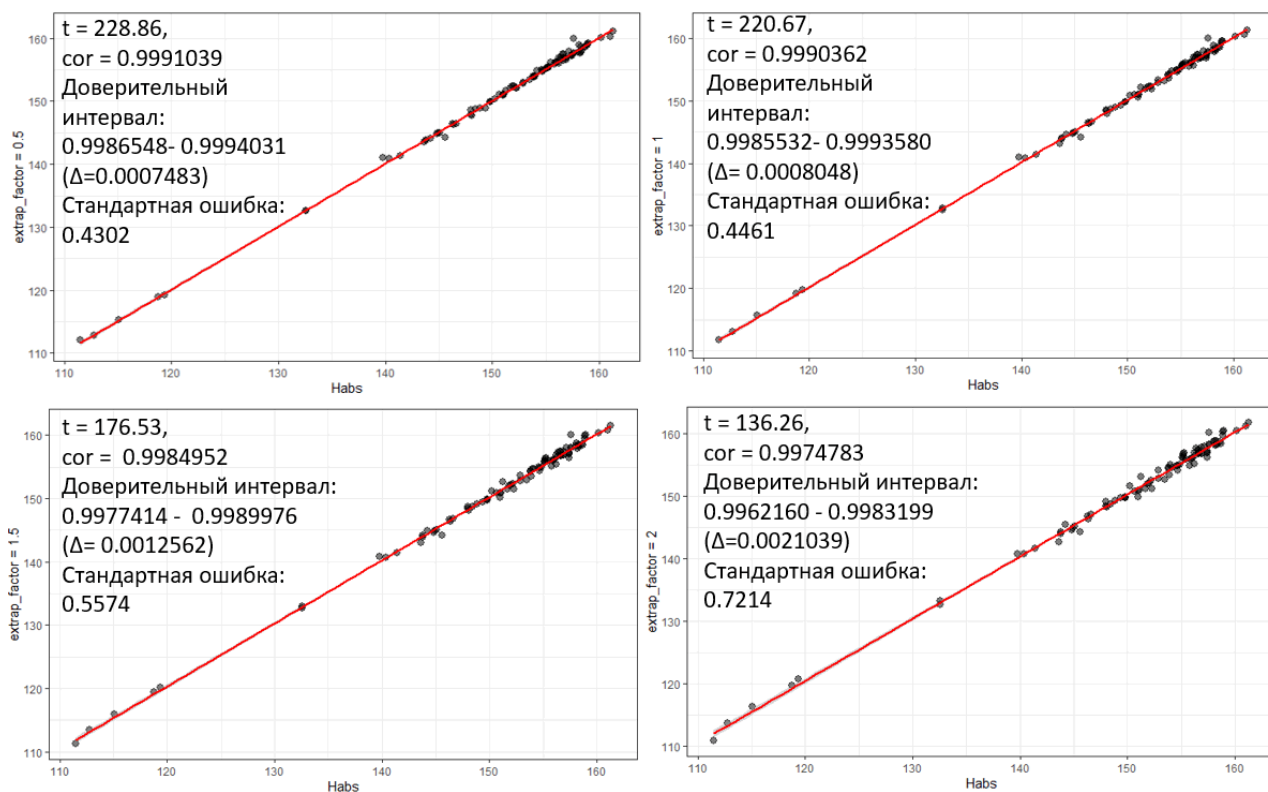


Рис. 8. Статистические параметры при оценке точности ЦМР при разных коэффициентах экстраполяции.

Для полученных ЦМР был рассчитан ряд статистических характеристик, включающий коэффициент корреляции Пирсона между реальными значениями высот в точках (ось 0X) и полученными при разных значениях КЭ (ось 0Y): от 0.5 на графике в левом верхнем углу до 2 – в правом нижнем (см. рис. 8). Также были рассчитан t-критерий Стьюдента, который показывает различия между средними. Чем больше его значения, тем в данном случае сильнее корреляция отличается от 0. Критерий значимости (p-value) во всех случаях очень низкий ($2.2 \cdot 10^{-16}$), что позволяет отвергнуть нулевую гипотезу о равенстве коэффициента корреляции нулю [32]. Согласно результатам статистических тестов, наибольшая связь между реальной высотой и предсказанной достигается при КЭ, равном 0.5: при этом значении максимален коэффициент корреляции, и минимальна стандартная ошибка

(43 см против 72 при коэффициенте экстраполяции = 2) и доверительный интервал. Таким образом, для дальнейших расчетов была выбрана ЦМР с КЭ, равном 0.5.

На следующем этапе ЦМР была отфильтрована в «SAGA» с помощью инструмента simple filter – это фильтр сферической матрицы с радиусом 2 для сглаживания неровностей (шумов) ЦМР. Суть действия состоит в том, что происходит пересчет значений центральной ячейки в соответствии со значениями соседних. Здесь был использован гладкий тип фильтра (smooth), который в противоположность острому (sharpen), усредняет разницу между центральной ячейкой и ее окружением, и новое значение получается по формуле $z' = \bar{z}$, где \bar{z} соответствует среднему арифметическому значению ячеек [80].

Расчет морфометрических показателей. Все морфометрические величины (МВ), за исключением SIMWE, были рассчитаны в программе «SAGA» и в основном в модуле Basic terrain Analysis. В качестве входных параметров выступали значения высот с ЦМР. Суммарно было получено 31 МВ: отмывка рельефа, кривизны, индекс конвергенции, замкнутые понижения, топографический индекс влажности, вертикальное превышение над водотоками, индекс плоскости днищ долин (MRVBF), интерполированное значение базиса эрозии, глубина долин, относительное положение склона, классификации форм рельефа различными методами, индекс долин (рассчитывается на основе ЦМР с использованием top-hat трансформации – операции математической морфологии на основании радиуса выбранной окрестности), индекс топографической позиции (относительные превышения) в окрестностях от 100 до 2100 м с шагом в 200 м. На рис. 9 представлены некоторые из них. Рассматривая детальнее, морфологическая структура междуречья и прилегающих территорий становится еще более понятной. Мультимасштабный индекс MRVBF (карта № 1) отделяет относительные крутые склоновые позиции рельефа от условно плоских днищ водотоков, террас, пойм и центральных частей междуречья. Чем больше значения индекса, тем более плоской является территория, и на ней происходит замедление потоков и концентрация вещества и воды. Этот показатель хорошо коррелирует с размещением замкнутых понижений (карта № 2), максимум которых приходится на плоские участки МВМ и другие замедленно дренируемые позиции. Их наибольшая глубина не превышает 0.8

м, а средние значения приходятся на 0.2 м. Вертикальное расстояние до водотоков (карта № 3) показывает превышение хорошо дренируемых плакоров над днищами овражно-балочной сети на 11 м, в то время как ограниченное ими междуречье находится практически на одном гипсометрическом уровне с речной сетью. Относительные превышения в окрестности 1700 м (карта № 4) демонстрируют максимумы и минимумы на мезомасштабном уровне, отделяя крупные овраги и балки до 6 м глубиной относительно нулевых значений в центре МВМ, а также упомянутые ранее выпуклые плакоры.

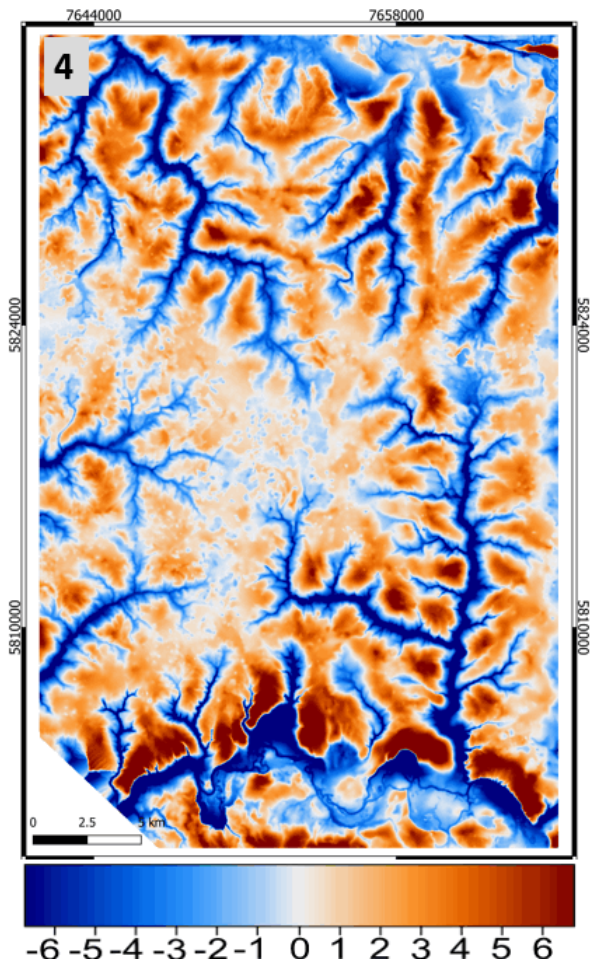
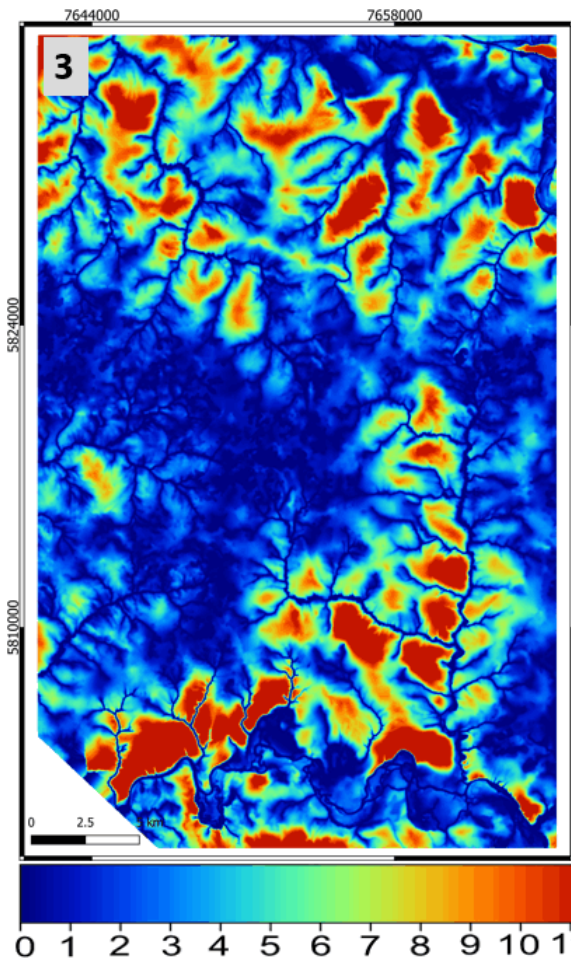
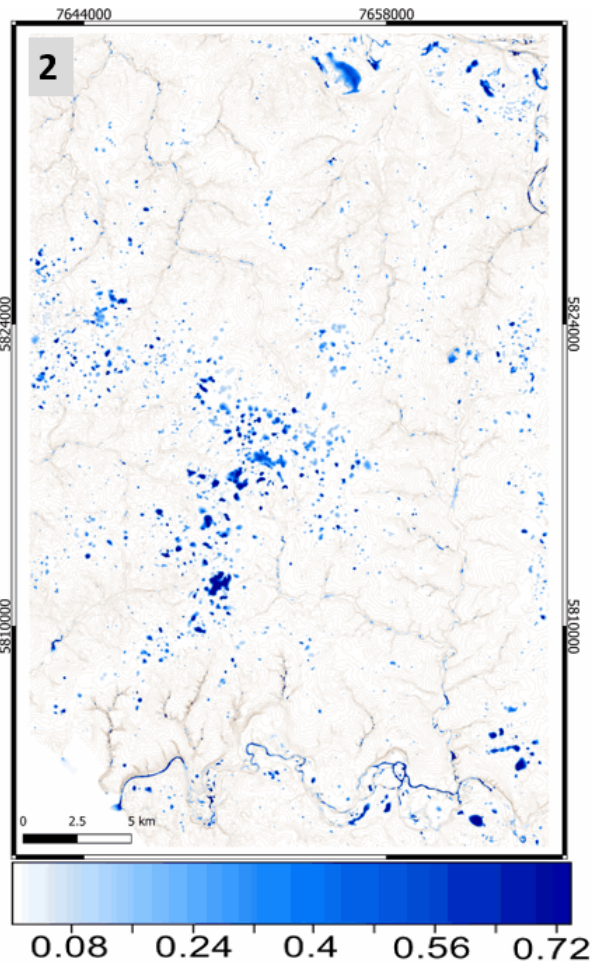
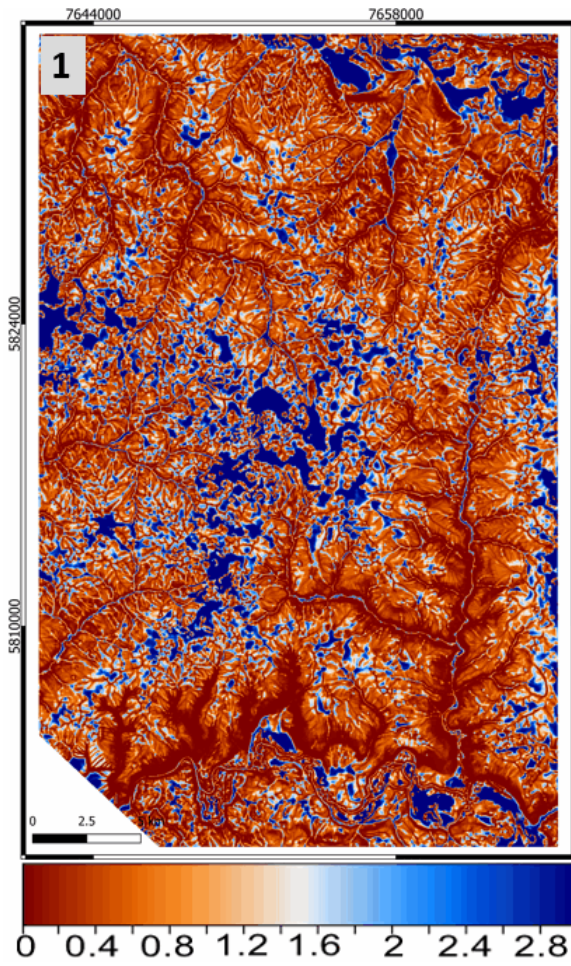


Рис. 9. морфометрические величины: 1 – индекс плоскости днищ долин, 2 – глубина замкнутых понижений (м), 3 – вертикальное расстояние до водотоков (м), 4 – превышения в окрестности 1700 м (м).

Моделирование перераспределенного слоя осадков (SIMWE) осуществлялось в свободном ПО «GRASS GIS». Первым делом в программе на основе растра ЦМР рассчитываются кривизны (плановая и профильная), которые затем совместно с высотами ЦМР используются как входные параметры при моделировании. Для корректных результатов необходимо задать ряд сопутствующих параметров. В качестве избыточного значения количества осадков была принята величина в 50 мм/час; инфильтрация воды в насыщенную влагой почву – в 6 мм/час; коэффициент шероховатости (Маннинга) в соответствии с характером территории – в 0.3. Полученный растр, отображающий перераспределенный по элементам рельефа слой осадков, можно видеть на рис. 10. Результаты свидетельствуют о наибольших значениях на тех участках, которые и так избыточно насыщены влагой в течение года: днища речной и овражно-балочной сети, а также микропонижения на междуречье. Несмотря на достоверный результат в целом, у модели есть недостаток – отсутствие переменной, которая учитывала бы нарастание потока влаги при движении от верхних элементов рельефа к нижним.

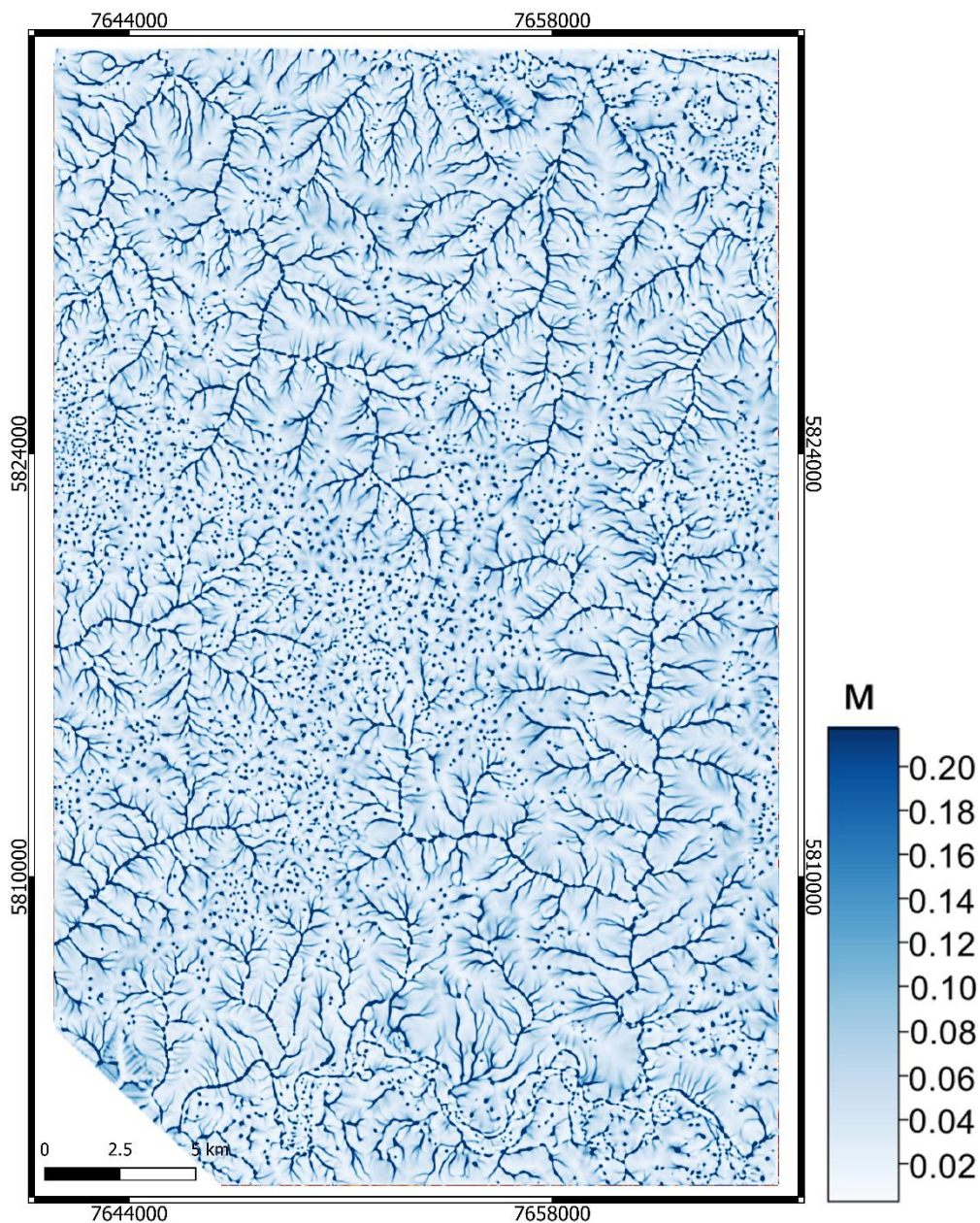

























Рис. 10. Перераспределенные слой осадков (SIMWE), м.

Подготовка обучающей выборки состояла в агрегировании в единый векторный слой информации с почвенных карт, созданных в результате обследования 1988 г. под руководством Б.П. Ахтырцева. Всего для моделирования было использовано 256 точек комплексных почвенных описаний:

Индекс почвы	Обозначение на карте	Группа	Обозначение на карте
Лч (101)		Лугово-черноземные (101)	
Чв (27)		Черноземы (32)	
Чт (20)			
Слн (2)		Солонцы (2)	
Чл (34)		Черноземно-луговые (43)	
Члвл (9)			
Л (12)		Серые лесные (11)	
Лпгэ (10)		Серые лесные поверхностно-глеево- элювиальные и болотные (почвы западин) (32)	
Бл (18)			
Бт (4)			
Асл ¹ (7)		Пойменные (17)	
А ² (9)			
Авл ³ (1)			
Почвы ОБК ⁴ (41)		Почвы ОБК (41)	
		Эродированные (16)	

¹ – аллювиальные слоистые, ² – аллювиальные, ³ – аллювиально-влажно-луговые, ⁴ – почвы овражно-балочного комплекса. В скобках указано количество точек

Поскольку для статистического анализа выборка должна быть репрезентативной и содержать достаточное количество точек, проводить моделирование с исходным набором типов и подтипов почв было бы некорректно. Ввиду этого они были организованы в группы с учетом схожести свойств и условий формирования (см. рис. 11). Категория эродированных почв была создана по большей части из черноземов выщелоченных, занимающих склоновые позиции и имеющих признаки

смыва. Солонцы не учитывались при дальнейшем моделировании из-за их небольшой площади.

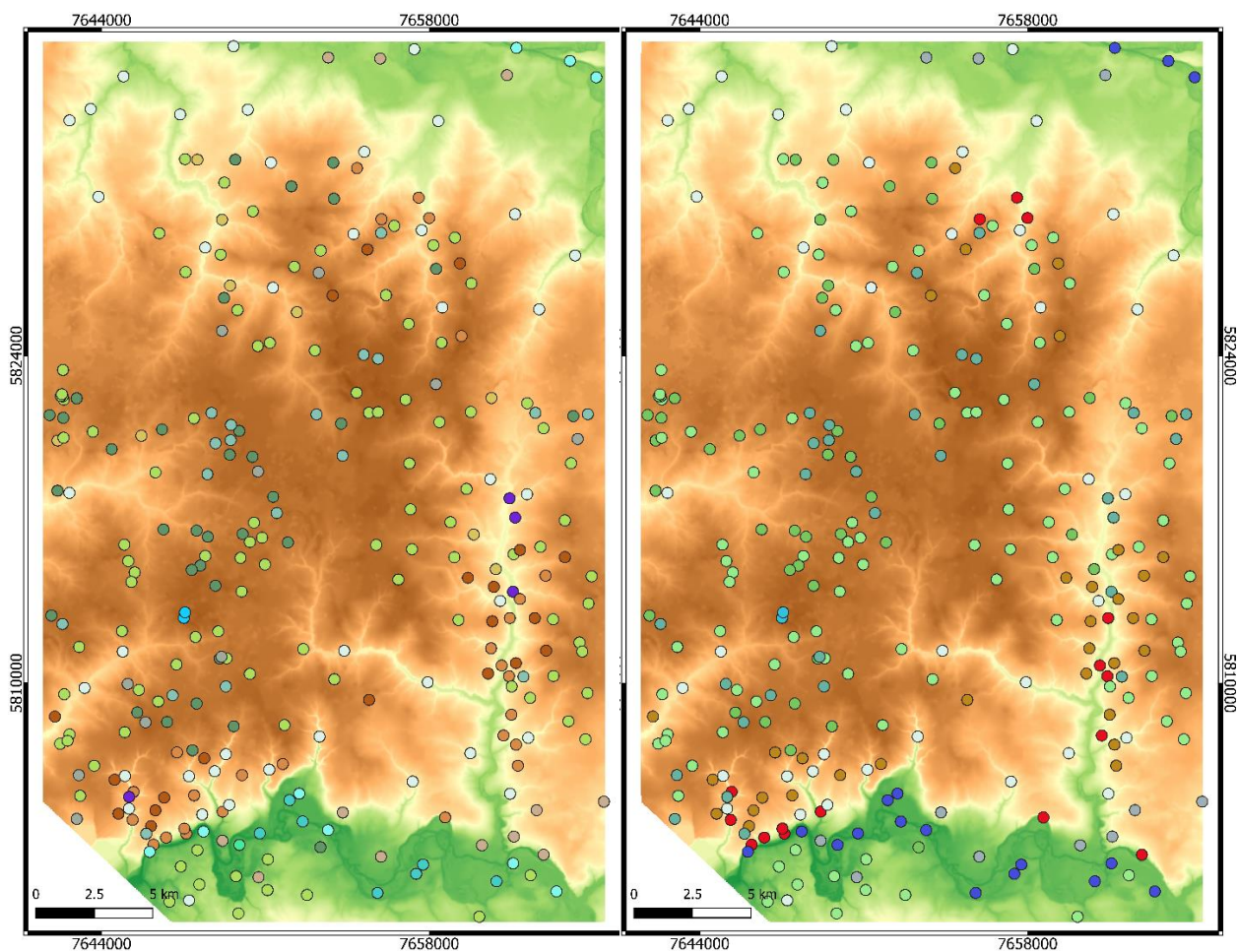


Рис. 11. Исходные точки почвенных описаний (слева) и группы почв (справа)

Данным точкам с известными координатами был сопоставлен набор морфометрических величин (в т.ч. результаты SIMWE), рассчитанных на предыдущем этапе. Последующее моделирование почвенно-ландшафтных связей (ПЛС) производилось на их основании в программах «STATISTICA» и «RStudio».

Глава 4. Структурно-функциональная организация ландшафтов Матыро-Воронежского междуречья

4.1 Моделирование почвенно-ландшафтных связей методом линейного дискриминантного анализа

В роли индикаторов структуры ландшафтов (природно-территориальных комплексов) выбраны структуры почвенного покрова как единственный доступный компонент для полноценного изучения в условиях повсеместной распашки.

Для имеющейся обучающей выборки был произведен линейный дискриминантный анализ (ЛДА) с исключением по F-критерию (Фишера), т.е. изначально в модель включались все переменные и затем на основании этого критерия были выбраны те из них, которые вносят наибольший вклад в разделение совокупностей. Из всего набора параметров самыми значимыми оказались следующие:

Таблица № 4 Состав региональной модели ПЛС* по методу ЛДА

	МВ	Value (Лямбда Уилкса)	Критерий Фишера	р-критерий	Индицируемый процесс
1	Крутизна, °	0.68	16.77	0.00	Скорость латерального переноса вещества
2	Вертикальное расстояние до водотоков, м	0.80	9.14	0.00	Дренируемость территории
3	Глубина долин, м	0.82	7.74	0.00	Интенсивность врезания овражно-балочной и речной сети
4	Глубина замкнутых понижений, м	0.86	5.88	0.00	Расположение бессточных участков с повышенным гидроморфизмом

* - почвенно-ландшафтных связей

Состав региональной модели ПЛС демонстрирует, что наиболее важными показателями оказались те, которые связаны с интенсивностью эрозионных процессов и водным режимом территории, накоплением и перераспределением влаги. Это подтверждает важность роли водно-миграционных процессов в функционировании на ключевом участке.

Таблица № 5 Предсказание групп почв

Группа почв	Точность предсказания, %	% отнесения к разным группам почв							
		Ч	Лч	Чл	Почвы западин	Л	А	Эр*	Почвы ОБК
Ч	53.13	<i>53.13</i>	34.38	0	0	9.38	3.13	0	0

Лч	52.81	15.73	<i>52.81</i>	28.09	0	2.25	1.92	0	0
Чл	56.82	0	22.73	<i>56.82</i>	6.82	6.82	0	0	6.82
Почвы западин	41.94	3.23	16.13	22.58	<i>41.94</i>	0	3.23	6.45	6.45
Л	33.33	0	22.22	22.22	0	<i>33.33</i>	22.22	0	0
А	58.82	0	17.65	11.76	5.88	0	<i>58.82</i>	0	5.88
Эр	56.25	18.75	6.25	0	0	6.25	0	<i>56.25</i>	12.5
Почвы ОБК	58.54	0	2.44	14.63	4.88	2.44	12.20	4.88	<i>58.54</i>
Всего	53.05								

* - эродированные почвы

Методом линейного дискриминантного анализа с использованием выявленных значимых переменных были предсказаны точности групп почвы (таблица №5) и показано ошибочное отнесение класса к другой группе. Так, черноземы частично были классифицированы как лугово-черноземные почвы в тех позициях, которые являются переходными от выпуклых плакоров к плоскому междуречью. Лугово-черноземные почвы, как и почвы западин, по большей части пересекаются со слабодренированными черноземно-луговыми. Серые лесные почвы, сформированные на террасах, определены хуже всего из-за их неоднозначного положения и схожими с другими почвами морфометрическими параметрами, и частично отнесены к пойменным из-за их близости к речной сети. Категория эродированных почв пересекается в признаковом пространстве с черноземами, поскольку это в основном и есть черноземы с признаками смыва, а также с почвами ОБК, которые формируются в результате смыва и намыва в пределах оврагов и балок с крутыми склонами. Почвы ОБК частично классифицируются как все другие категории за исключением наиболее дренированных черноземов, в связи с тем, что они так же, как и гидроморфные почвы междуречья характеризуются повышенной влажностью, как почвы пойм – положением в пониженных элементах рельефа и как эродированные – признаками смыва со склонов.

В результате моделирования были получены апостериорные вероятности, принимаемые за долевое участие группы почвы в каждом пикселе ЦМР и наиболее

вероятный класс для всех элементов регулярной сетки. Долевое участие типизируется как почвенные комбинации, состоящие из элементарных почвенных ареалов, различающихся на уровне типа или подтипа и связанных с контрастными условиями увлажнения [45]. Оценка точности производится с помощью карты неопределенности прогноза и экспертно-визуальным способом в соответствии с региональными представлениями о территории.

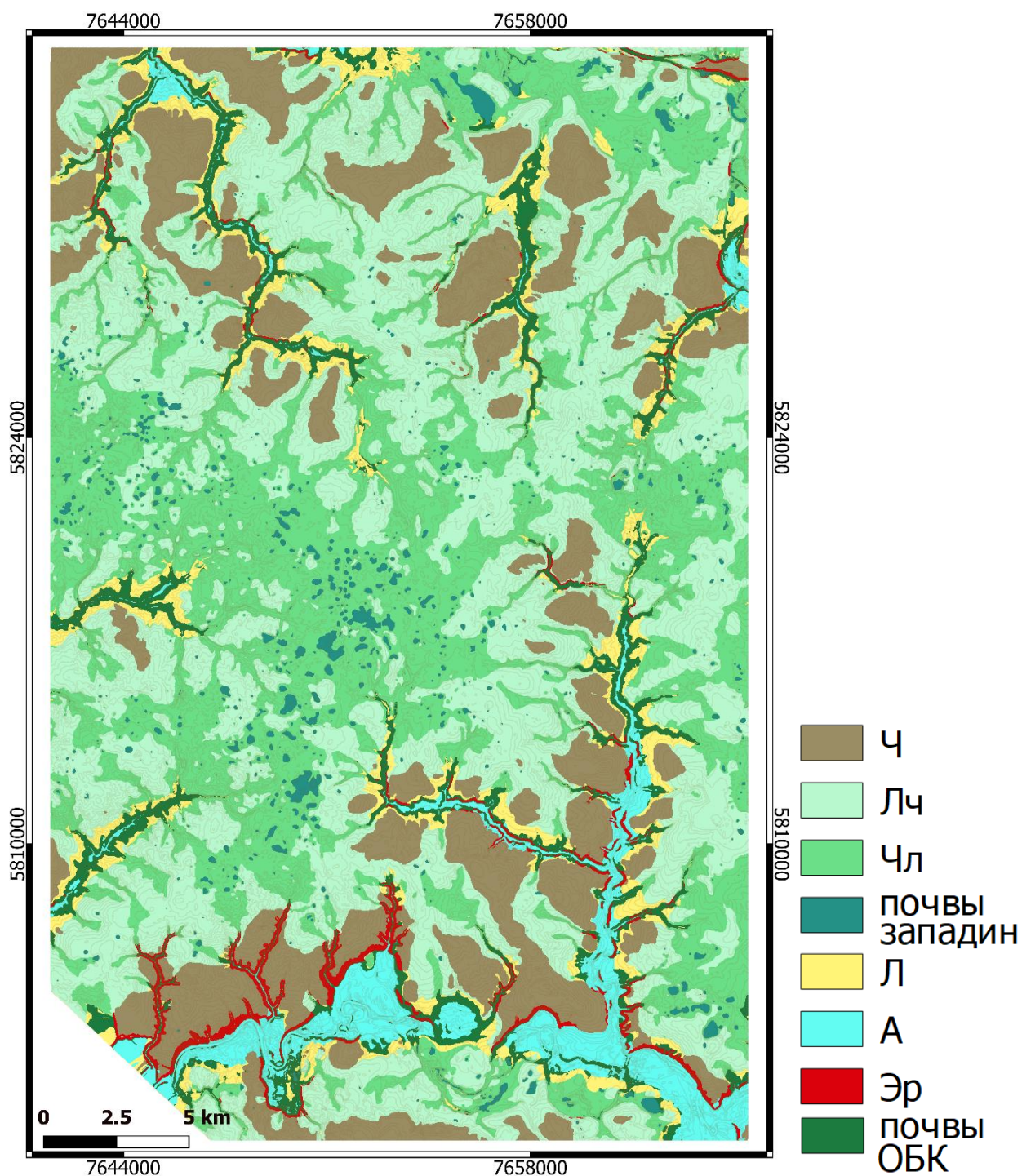


Рис. 12. Доминантные почвенные комбинации в пикселе (составлено автором по результатам моделирования методом ЛДА)

На рис. 12 отражены почвенные комбинации, которые с наибольшей вероятностью встречаются в каждом пикселе. Фоном показаны лугово-черноземные почвы (Лч), занимающие слабодренлируемые плоские междуречные поверхности. Территории с черноземно-луговыми почвами (Чл) интерпретируются как недренируемые внутренние участки междуречья с еще большим влиянием гидроморфизма. Их формирование свидетельствует не только о меньшей крутизне, но и значительном влиянии подстилающих пород (морены) на характер стока и фильтрации. На карте хорошо выделяются западины в понижениях рельефа и не только в пределах междуречья, но и вблизи речной сети. Наиболее обширные приурочены к центральным частям и граничат с гидроморфными Чл. Серые лесные почвы (Л) определяются довольно неоднозначно: помимо местоположения на террасах, для которых типичны, они появляются на междуречье и излишне по бортам оврагов и балок, что не совсем корректно. В то же время, их представленность непосредственно на террасах мала, особенно в долине р. Воронеж. Это связано с тем, что Л по положению в рельефе и по параметрам морфометрических величин пересекаются в признаковом пространстве с другими типами почв и подавляются ими. Пойменные почвы хорошо предсказаны в долине Матыры и в пределах крупных оврагов, однако этого нельзя сказать про долину Воронежа. Кроме того, в некоторых местах они путаются с почвами ОБК внутри эрозионной и частично речной сети. Что касается эродированной категории, то она проявляется на крутых склонах речных долин и некоторых овражно-балочных комплексов.

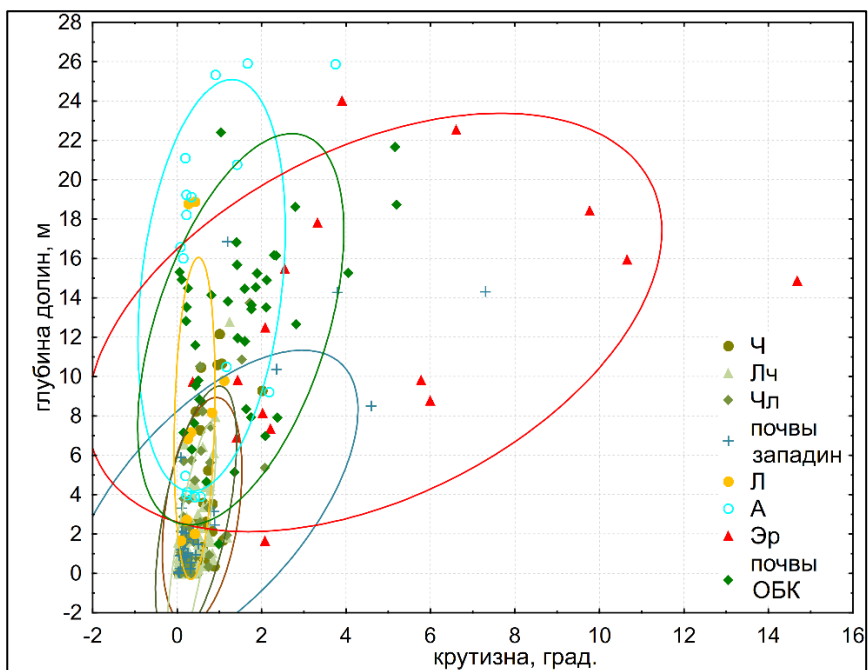


Рис. 13. положение почвенных комбинаций в признаковом пространстве индикационных характеристик

Из рисунка 13 видны общие закономерности размещения почв в зависимости от значений глубины долин и крутизны на региональном уровне. Эллипсами отражены области, в которых встречается 95% всех значений. Так, например, однозначно выделяются эродированные почвы, для которых типичны максимальные значения крутизны; или пойменные почвы – по наибольшим значениям глубины долин.

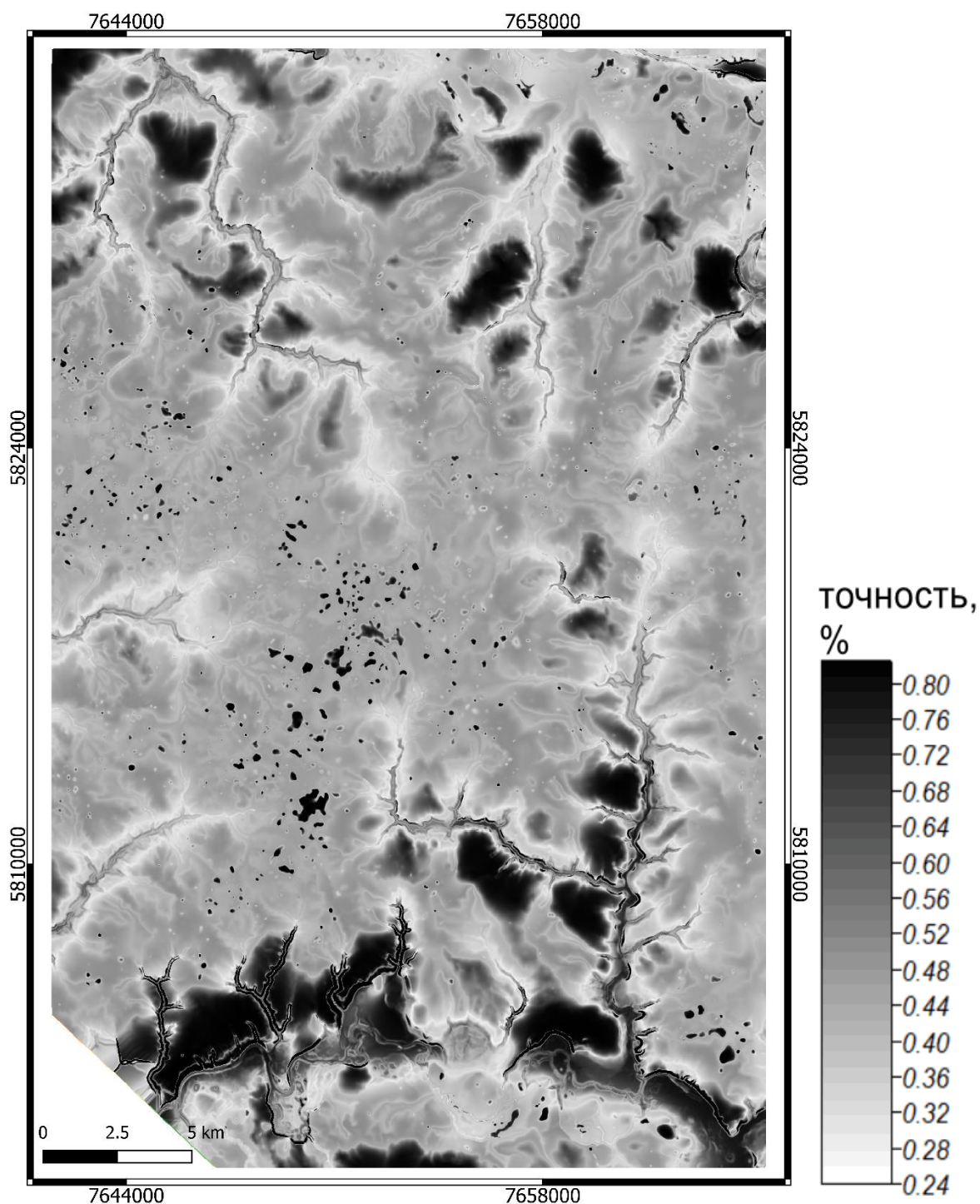


Рис. 14. Неопределенность моделирования методом ЛДА

Точность моделирования варьирует в широких пределах (см. рис. 14). Наиболее неопределенными остаются пограничные междуречные и долинные участки – части склонов и террасы. Там же возникает наибольшая путаница с отнесением имеющихся точек почвенной выборки к одному классу (см. таблицу № 5). Максимальная точность характерна для плакоров и западин, которые по набору индикационных характеристик отделяются от других категорий наилучшим

образом. В целом точность составила 53.1%. Из-за довольно большой неопределенности и не очень высокой точности было принято решение провести ЛДА отдельно для междуречья и речных долин, поскольку, скорее всего, факторы дифференциации для этих двух категорий отличаются, и соединять их в одной модели не совсем корректно. В почвы междуречья были включены Ч, Лч, Чл и почвы западин; в категорию долинных – Л, А, Эр и почвы ОБК.

Наиболее значимыми переменными для моделирования почвенно-ландшафтных связей, согласно критерию Фишера, стали величины, полученные в результате автоматической классификации рельефа и относительные превышения в окрестности 1300 пикселей (3.3 км) – см. рис. 15:

Таблица № 6

Состав модели ЛДА для междуречья и долин

	МВ	Value (Лямбда Уилкса)	Критерий Фишера	р-критерий	Описание
1	Индекс долин	0.76	88.87	0.00	Отделение долин от междуречий
2	Относительные превышения в окрестности 1300 пикселей, м	0.97	7.7	0.00	Мезомасштабные понижения и повышения
3	Классификация форм рельефа	0.98	6.18	0.01	Автоматическое выделение элементов рельефа

Таблица № 7

Точность предсказания междуречья и долин

Категория	Точность предсказания, %	% отнесения к категориям	
		междуречья	долины
Междуречья	91.58	91.58	8.42
Долины	81.69	18.31	81.69

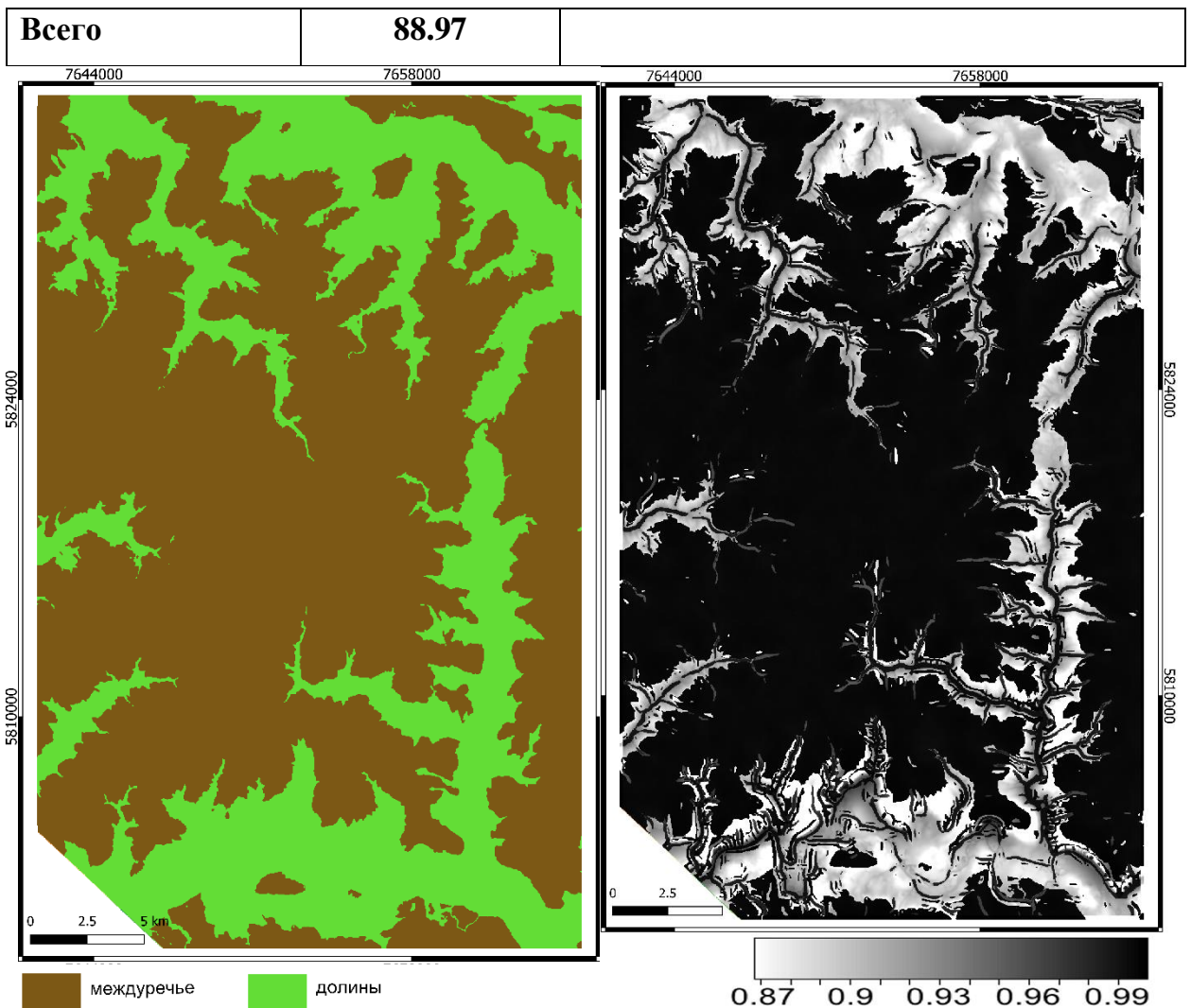


Рис. 15. Результат ЛДА для междуречья и долин (слева) и точность моделирования (в сотых долях от единицы, справа)

После разделения выборки на категории почв междуречья и долин был произведен повторный анализ значимости переменных с помощью критерия Фишера для этих двух групп. Результаты анализа представлены в таблице № 8.

Таблица № 8

Состав модели ЛДА отдельно для междуречья и долин

	МВ	Value (лямбда Уилкса)	Критерий Фишера	р- критерий	Индицируемый процесс
МЕЖДУРЕЧЬЕ					
1	Индекс долин	0.73	25.70	0.00	Снос материала и влаги в долины

2	Вертикальное расстояние до водотоков, м	0.77	21.35	0.00	Дренируемость территории
3	Глубина замкнутых понижений, м	0.88	9.27	0.00	Расположение бессточных участков с повышенным гидроморфизмом
4	Относительные превышения в окрестности 100 пикселей, м	0.95	3.97	0.00	Перераспределение тепла и влаги на локальном уровне
ДОЛИНЫ					
1	Крутизна, °	0.71	27.09	0.00	Скорость латерального переноса вещества
2	Индекс долин	0.86	10.20	0.00	Снос материала и влаги в долины
3	Относительные превышения в окрестности 1900 пикселей, м	0.87	9.27	0.00	Перераспределение тепла и влаги на мезоуровне
4	Относительные превышения в окрестности 200 пикселей, м	0.90	7.22	0.00	Перераспределение тепла и влаги на локальном уровне

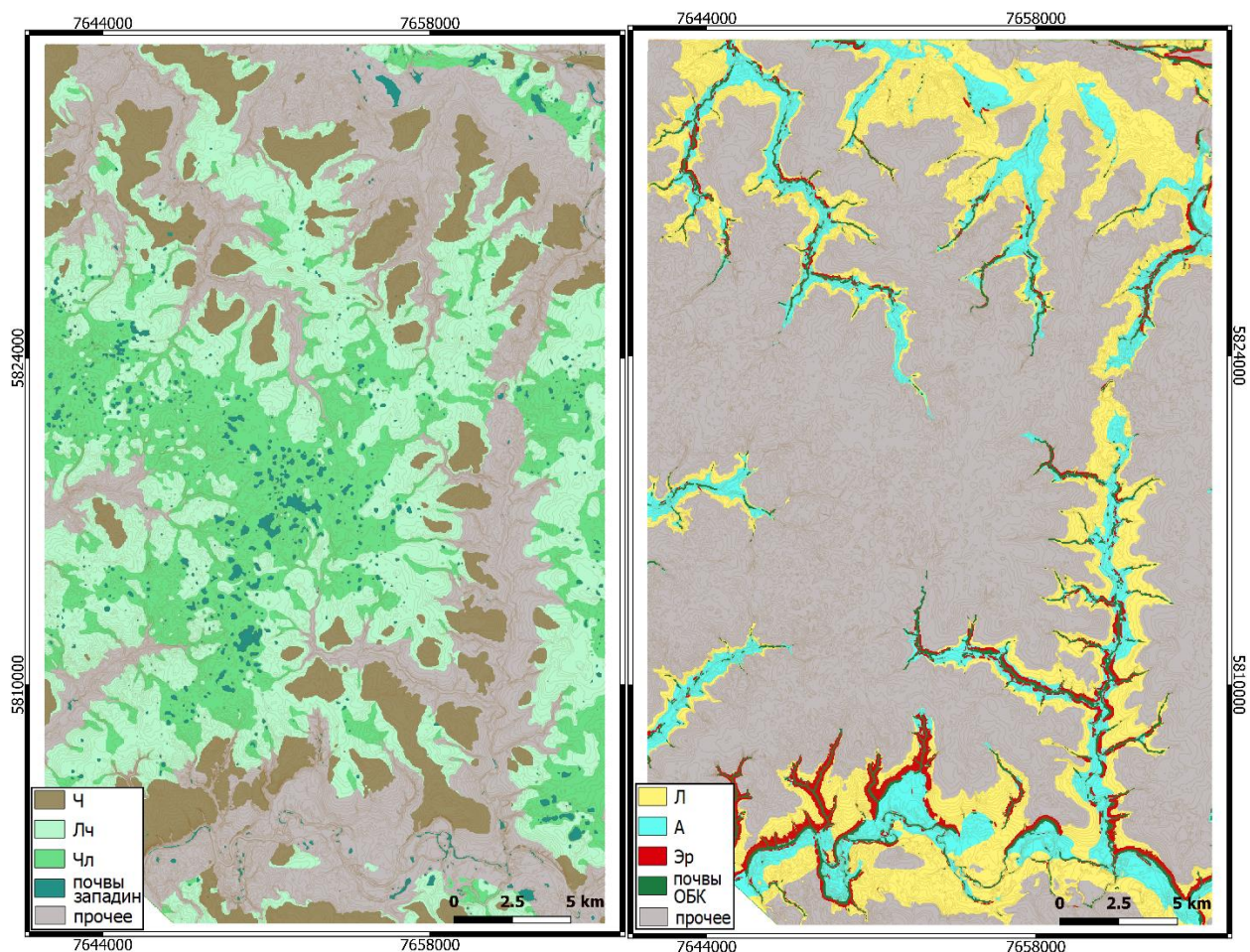


Рис. 16. Предсказание почвенных комбинаций для междуречья (слева) и долин (справа) методом ЛДА

Региональный набор переменных, определяющий дифференциацию почвенного покрова для двух контрастных категорий, характеризует геостационарную и геодинамическую составляющие СФО. Иными словами, субстрат и рельеф, описываемые такими переменными, как вертикальное расстояние до водотоков и глубина замкнутых понижений, формируют основу для перераспределения потоков твердых и растворенных веществ, интенсивность которых характеризуется значениями крутизны и относительных превышений. Исходя из соответствующего набора МВ для междуречья, замечаем, что самое большое значение имеют характеристики увлажнения, под влиянием которых формируются почвы возрастающего ряда гидроморфизма: Ч → Лч → Чл → почвы западин. В то же время для долин определяющую роль играет фактор латерального переноса и накопления материала (см. рис. 16).

Таблица № 9

Точность предсказания почв междуречья методом ЛДА

Категория	Площадь, %	Точность предсказания, %	% отнесения к категориям				
			Ч	Лч	Чл	Почвы западин	Прочее ¹
Ч	20.61	50.00	50	28.13	0	0	21.88
Лч	47.32	51.11	17.78	51.11	26.67	1.11	3.33
Чл	29.04	47.62	0	26.19	47.62	7.14	19.05
Почвы западин	3.03	40.63	3.13	15.66	21.88	40.63	18.75
Прочее	-	87.37	4.21	4.21	1.05	3.16	87.37
Всего²	100	55.23					

¹ – почвы долин (Л, А, эродированные, почвы ОБК) ² – здесь и далее – без учета категории прочих почв

Таблица № 10

Точность предсказания почв долин методом ЛДА

Категория	Площадь, %	Точность предсказания, %	% отнесения к категориям				
			Л	А	Эр ¹	Почвы ОБК	Прочее ²
Л	58.31	66.67	66.67	11.11	0	0	22.22
А	27.52	52.94	29.41	52.94	0	17.65	0
Эр	6.8	62.50	18.75	6.25	62.50	6.25	6.25
Почвы ОБК	7.37	80.49	4.88	12.20	0	80.49	2.44
Прочее	-	87.24	6.63	4.08	1.53	0.51	87.24
Всего	100	73.42					

¹- эродированные, ²- почвы междуречья (Ч, Лч, Чл, почвы западин)

Для того, чтобы оценить, при каких значениях определяющих морфометрических величин предсказывается та или иная категория, следует рассмотреть их средние значения для выделенных классов (табл. № 11, 12.).

Таблица № 11

Средние значения МВ для почв междуречья

МВ	Ч	Лч	Чл	Почвы западин
Индекс долин	0.22	0.03	0.19	0.22
Вертикальное расстояние до водотоков, м	8.8	3.8	1.22	2.07
Глубина замкнутых понижений, м	0	0	0.04	0.32
Относительные превышения в окрестности 100 пикселей, м	0.09	0.04	-0.10	-0.73

В соответствии со средними значениями морфометрических величин для каждой категории почв (табл. № 11) становится понятным их положение в пространстве индикационных характеристик. Так, Ч встречаются, очевидно, на наиболее возвышенных слабовыпуклых (об этом свидетельствует небольшое положительное значение относительных превышений) позициях рельефа на максимальном удалении от водотоков (8.8 м). Лч расположены ближе к базису эрозии на более плоских участках. В их пределах, так же, как и в ареале черноземов, отсутствуют замкнутые понижения. Чл, напротив, уже типичны в слабовогнутых позициях, где формируются нано- и микрозападины (со средней глубиной – 4 см). в то же время почвы западин тяготеют к более глубоким отрицательным и вогнутым формам рельефа. Они определяются в локальных понижениях глубиной более 0.7 м в окрестности радиусом 100 пикселей (2.5 км). Индекс долин, который варьирует от 0 (междуречье) до 1 (долины), во всех случаях указывает, что данные категории относятся к междуречью, однако у черноземов и почв западин по сравнению с другими почвами этот индекс выше. Этот факт в случае западин можно объяснить их приуроченностью к пониженным вогнутым элементам рельефа, что также типично для долинных комплексов. В случае черноземов, вероятно, это значение обусловлено их положением на границе с долинами и частично с эродированными почвами, которые хотя и близки по ряду параметров, но при этом входят в группу почв долин, расположенных на крутых склонах.

Таблица № 12

Средние значения МВ для почв долин

МВ	Л	А	Эр	Почвы ОБК
Крутизна, °	0.43	0.82	4.68	1.51
Индекс долин	0.78	1	0.94	0.98
Относительные превышения в окрестности 1900 пикселей, м	0.63	-6.40	-3.86	-8.03
Относительные превышения в окрестности 200 пикселей, м	0	-0.59	0.62	-3.18

В речных долинах влияние оказывают другие факторы (табл. № 12). Все почвы имеют значение индекса долин, близкое к 1 или равное ему, что позволяет их отнести именно к категории долинных. Серые лесные почвы среди всех наиболее приближены к почвам междуречья из-за их незначительной крутизны (0.43°) и положения на плоских и возвышенных участках при рассмотрении на локальном и региональном уровне соответственно (0 м и 0.63 м). Пойменные почвы однозначно определяются в вогнутых днищах долин. Для эродированных типичны максимальные среди других категорий средние значения крутизны, благодаря чему они хорошо выделяются. Отрицательное значение показателя относительных превышений в большой окрестности (-3.86), которое меньше таковых для пойменных почв и почв ОБК, но больше, чем для серых лесных, подтверждает положение эродированных почв на склонах (см. рис. 17). Наконец, почвы ОБК занимают узкие днища и частично склоны эрозионной сети, которая выделяется как в детальном, так и региональном масштабе (глубина составляет от 3 до 8 м).

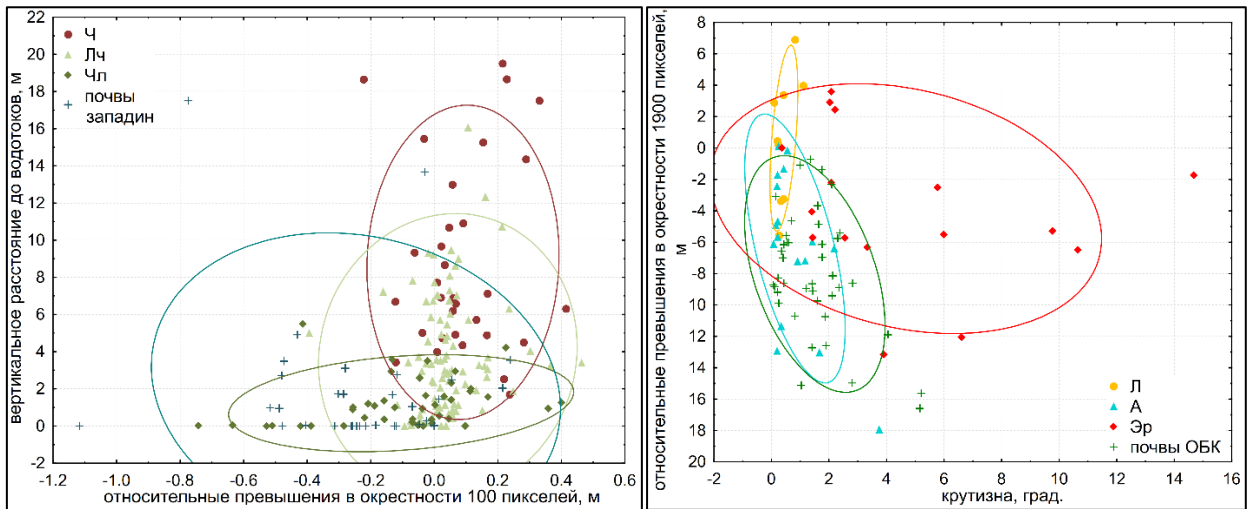


Рис. 17. Положение групп почв в пространстве индикационных характеристик

Точность моделирования представлена на рис. 18. На карте для междуречья высокую точность имеют почвы западин. Наибольшая неопределенность – у черноземов из-за их пограничного положения и «конфликтов» с серыми лесными почвами террас. Категория почв долин – «прочее» предсказана наилучшим образом из-за своей контрастности и объема выборки. Тот же принцип объясняет отличную определенность почв междуречья при предсказании почв долин. Внутри непосредственно долинных комплексов высокую точность имеют эродированные почвы и почвы ОБК благодаря отличительным значениям крутизны в первом случае и положения в пониженных формах рельефа в разном масштабе – во втором. В то же время неопределенность в наибольшей степени характерна для серых лесных почв, причина которой – пограничное положение и близость по характеристикам к междуречным позициям.

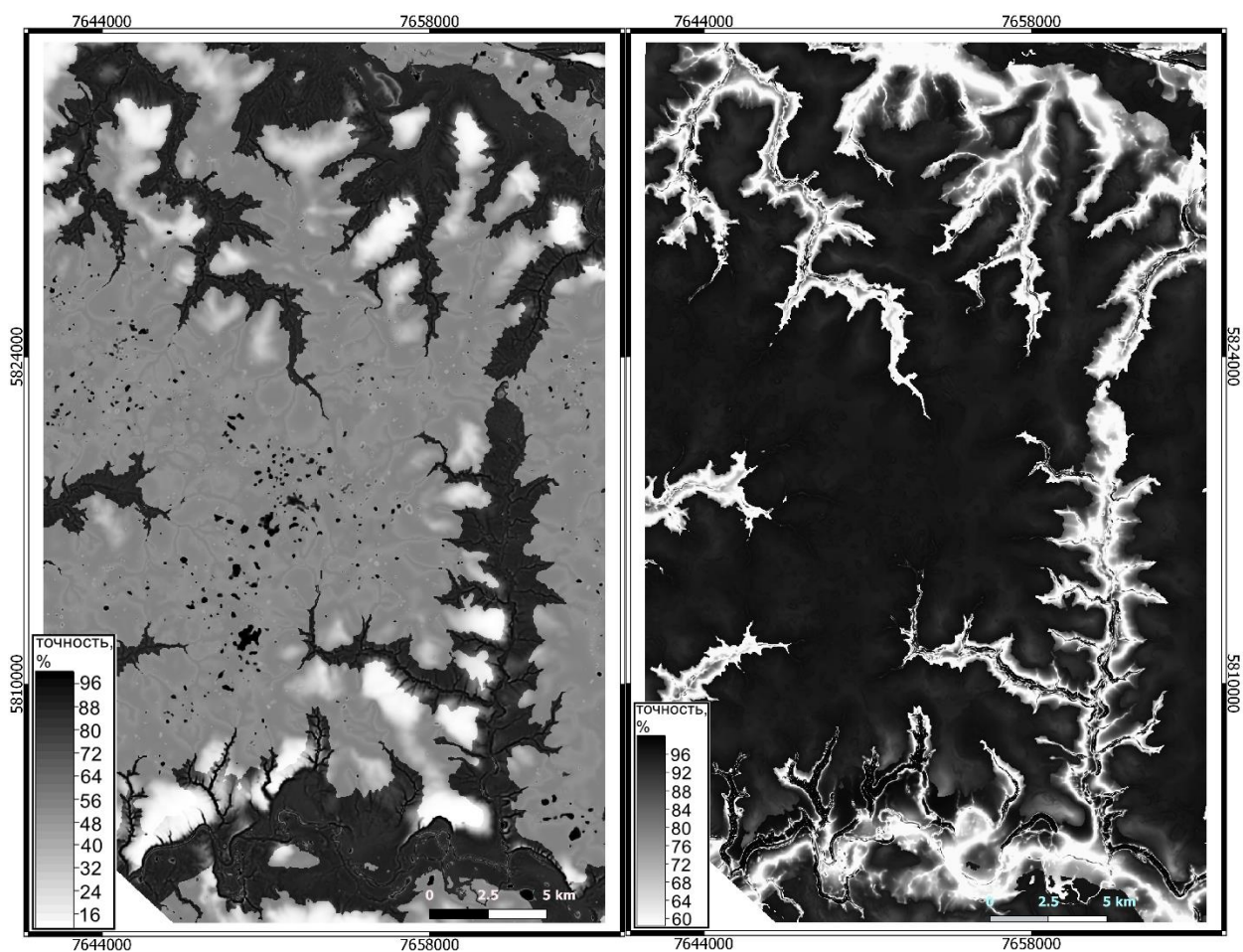


Рис. 18. неопределенность моделирования междуречья (слева) и долин (справа)

4.2 Моделирование почвенно-ландшафтных методом **random forest**

Моделирование почвенно-ландшафтных связей для установления закономерностей СФО данным методом и методом опорных векторов производилось в программе «RStudio» на языке программирования R по алгоритму, разработанному Д.Н. Козловым и Н.И. Лозбенывым [74]. После подготовки таблицы с обучающей выборкой и оценки формальной значимости предикторов – производных характеристик рельефа – с помощью линейной регрессионной модели, был подобран ряд параметров, благодаря которому удалось добиться наилучшей точности предсказания групп почв междуречья и долин (см. табл. № 13):

Таблица № 13

Параметры моделирования методом random forest

МВ	Коэффициент Джини	Количество «деревьев»	Число переменных на каждом шаге построения	Мин. число переменных в узле	Число наблюдений в случайной подвыборке
МЕЖДУРЕЧЬЕ					
Относительные превышения в окрестности 2100 пикселей, м	11.47	80	2	1	50
Вертикальное расстояние до водотоков, м	9.84				
Крутизна, °	8.97				
Индекс долин	6.37				
ДОЛИНЫ					
Вертикальное расстояние до водотоков, м	10.21	300	2	1	50
Глубина долин, м	9.02				
Крутизна, °	8.51				
Относительные превышения в окрестности 2100 пикселей, м	8.24				

На рис. 19. показано, каким образом и при каких значениях переменных происходит разделение категорий почв. При классификации междуречья однозначно на первом шаге отделяются почвы долин, в то время как почвы междуречья на нижнем графике («прочее») выделяются при большем количестве задействованных МВ. Из-за этого в том числе во втором случае требуется больше деревьев классификации.

Таблица № 14 Точность предсказания почв междуречья методом random forest

Категория	Площадь, %	Точность предсказания, %	% отнесения к категориям				
			Ч	Лч	Чл	Почвы западин	Прочее*
Ч	11.66	25	25	53.13	0	0	21.88
Лч	67.04	76.67	8.89	76.67	7.78	3.33	3.33
Чл	18.83	26.19	0	47.61	26.19	4.76	21.43
Почвы западин	2.47	25	0	40.63	12.5	25	21.88
Прочее	-	91.58	2.1	5.26	1.05	0	91.58
Всего	100	56.47					

*- почвы долин (Л, А, эродированные, почвы ОБК)

Таблица № 15 Точность предсказания почв долин методом random forest

Категория	Площадь, %	Точность предсказания, %	% отнесения к категориям				
			Л	А	Эр ¹	Почвы ОБК	Прочее ²
Л	5.27	22.22	22.22	0	0	0	77.78
А	24.5	35.29	0	35.29	0	35.29	29.42
Эр	25.07	56.25	0	6.25	56.25	12.5	25
Почвы ОБК	45.16	75.61	0	2.44	4.88	75.61	17.07
Прочее	-	94.39	0	0	1.53	4.08	94.39
Всего	100	76.67					

¹- эродированные, ²- почвы междуречья (Ч, Лч, Чл, почвы западин)

Точность предсказания отдельных почв довольно невелика, несмотря на неплохую общую точность. В отличие от ЛДА, в данном методе нет возможности задавать априорные вероятности, увеличивая таким образом точность предсказания. Поэтому здесь она пропорциональна количеству точек каждой категории.

При анализе результатов междуречья (рис. 20) заметны разрывы в ареалах черноземов на плакорах и в почвах западин, где в центре некоторых из них предсказаны более сухие Чл, ареал которых уже их реального распространения. Но в целом картина представляется правдоподобной. Что касается долин, то их площадь сильно редуцирована, а серые лесные почвы встречаются практически только в долине Матыры. Пойменные вообще практически не предсказаны там, где должны отчетливо встречаться. При этом почвы ОБК и эродированные расположены на своих местах в достаточном количестве.

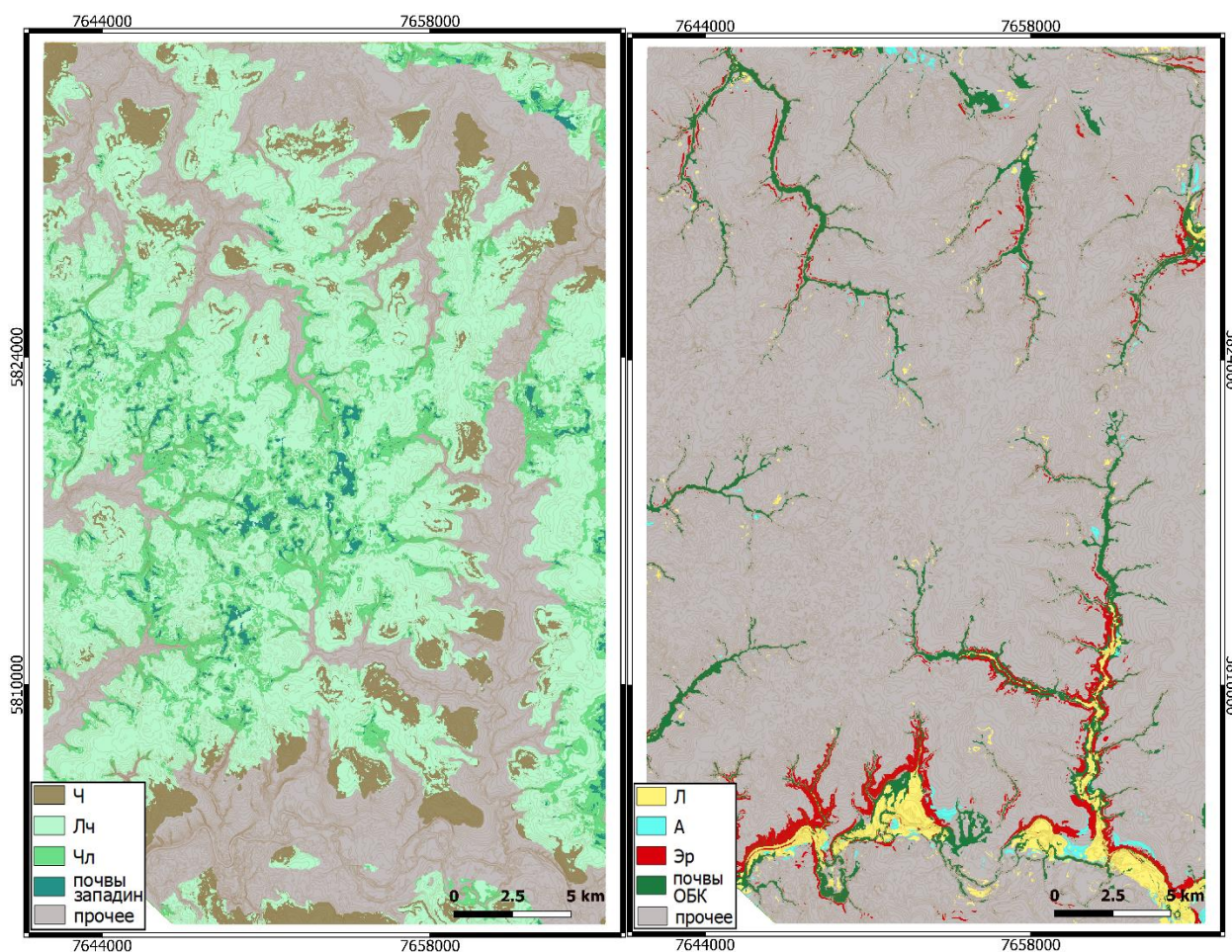


Рис. 20. Результаты моделирования методом random forest

Неопределенность прогноза имеет следующие тенденции: в пределах междуречья наилучшим образом предсказаны почвы западин и черноземы, хуже определено положение Чл. В почвах долин максимальная точность – у эродированных и почв ОБК, в то время как пойменные комплексы и почвы террас имеют высокую неопределенность.

4.3 Моделирование почвенно-ландшафтных связей методом опорных векторов

Таблица № 16

Параметры моделирования методом опорных векторов

МВ	Тип ядра	Количество опорных векторов	Аргумент cost	Радиус влияния каждой точки (γ)
МЕЖДУРЕЧЬЕ				
Индекс долин	Радиальная базисная функция	237	6	0.25
Относительные превышения в окрестности 2100 пикселей, м				
Крутизна, °				
Вертикальное расстояние до водотоков, м				
ДОЛИНЫ				
Глубина долин, м	Радиальная базисная функция	122	6	0.25
Относительные превышения в окрестности 2100 пикселей, м				
Крутизна, °				
Вертикальное расстояние до водотоков, м				

Как и в случае моделирования почвенно-ландшафтных связей методом random forest для установления особенностей СФО ключевого участка, здесь используются характеристики, выбранные как наиболее значимые при формальной оценке

(таблица № 16). Одним из ключевых параметров является аргумент *cost*, влияющий на количество опорных векторов. При описании хорошо разделимых непересекающихся классов используются его большие значения, в то время как для слабо разделимых задают маленькие значения. Аргумент был подобран на основании проведенного формального статистического анализа, при котором ошибка предсказания минимальна. В результате предварительного анализа было установлено, что границы между классами не являются линейными, что приводит к необходимости использования ядер, которые преобразуют исходное пространство в линейно разделимое пространство большей размерности. В данном случае в качестве ядер использованы радиальные базисные функции, значение которых зависит от расстояния между аргументом и некой фиксированной в пространстве точкой. Параметр *гамма* (γ) определяет влияние каждого элемента выборки на разделение пространства: чем выше его значение, тем больше роль элементов, непосредственно примыкающих к разделяющей плоскости. И наоборот, чем он ниже, тем больше элементов участвуют в разделении. В контексте настоящей работы алгоритму понадобилось больше опорных векторов для классификации почв междуречья, что говорит о меньших различиях внутри них по сравнению с почвами речных долин.

Таблица № 17 Точность предсказания почв междуречья методом опорных векторов

Категория	Площадь, %	Точность предсказания, %	% отнесения к категориям				
			Ч	Лч	Чл	Почвы западин	Прочее*
Ч	11.85	37.5	37.5	40.63	0	0	21.88
Лч	55.6	71.11	4.44	71.11	17.78	3.33	3.33
Чл	28.64	42.86	0	30.95	42.86	7.14	19.05
Почвы западин	3.91	37.5	3.13	31.25	18.75	37.5	9.38
Прочее	-	92.63	1.05	5.27	0	1.05	92.63
Всего	100	60.57					

* - почвы долин (Л, А, эродированные, почвы ОБК)

Таблица № 18

Точность предсказания почв долин методом опорных векторов

Категория	Площадь, %	Точность предсказания, %	% отнесения к категориям				
			Л	А	Эр ¹	Почвы ОБК	Прочее ²
Л	3.69	22.22	22.22	22.22	0	0	55.56
А	18.86	58.82	0	58.82	0	11.76	29.41
Эр	16.81	81.25	0	0	81.25	6.25	12.5
Почвы ОБК	60.65	85.37	0	2.43	2.43	85.37	9.76
Прочее	-	94.39	0	0	0.51	5.1	94.39
Всего	100	89.55					

¹- эродированные, ²- почвы междуречья (Ч, Лч, Чл, почвы западин)

Метод опорных векторов дает хороший результат, особенно для долин (табл. № 17, 18). При этом подходе возможно задать вес для каждой категории в соответствии с представлениями о распространенности почв в разных ландшафтно-топографических условиях. В связи с этим точность предсказания отдельных категорий повышается.

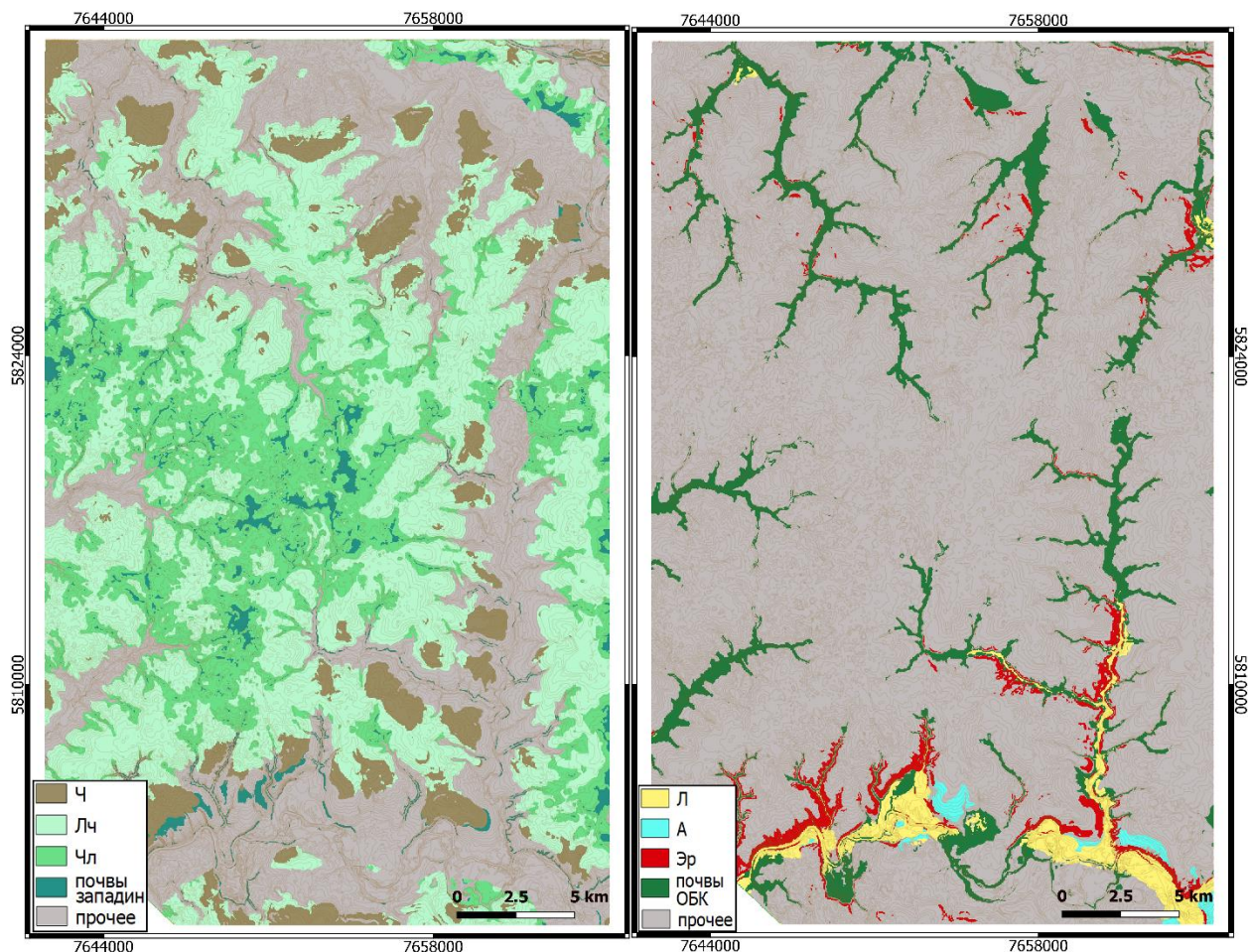


Рис. 21. Результаты моделирования методом опорных векторов (слева – междуречья, справа – долины).

На рис. 21 на междуречье хорошо представлены все категории: на центральных переувлажненных частях формируются почвы западин, их окружают Чл и затем Лч. Выпуклые дренируемые плакоры заняты черноземами. Кое-где внутри долин также предсказываются менее гидроморфные, а иногда и автоморфные почвы на островах среди речной сети. В долинах четко предсказаны почвы ОБК и эродированные, которые индицируют крутые склоны. Пойменные и серые лесные почвы конкурируют друг с другом за схожие позиции (относительные высоты и характер поверхности). К сожалению, в долине Воронежа они не предсказаны вовсе, хотя, несомненно, они там формируются.

4.4 Анализ результатов моделирования ПЛС разными методами

Выбранный для моделирования масштаб (размер пиксела 25×25 м) позволяет выделять структуры почвенного покрова (СПП) – почвенные комбинации, соотносимые с группами урочищ (типами местности) [22, 28, 46]. Согласно

представлениям Фридланда и его последователей, соответствующие им мезоструктуры почвенного покрова состоят из комбинаций микроструктур и приурочены к определенным формам мезорельефа и их группам (см. рис. 22). Так, например, в этой категории выделяются комплексы пойменных почв, почвы речных террас, почвы карстовых равнин и др. [45].



Рис. 22. Связь уровней пространственного почвенного покрова, масштаба и пространственного разрешения. WRB – World Reference Base of Soil Resources, KST – Keys to Soil Taxonomy [22].

Целесообразно при этом выделить агроэкологические группы, которые используются на стадии проектирования агроландшафтов в системе адаптивно-ландшафтного земледелия [18]:

Таблица № 19 Состав компонентов почвенных комбинаций и названия урочищ

	Название почвы	Почвенные комбинации	Агроэкологическая группа земель	Типы местности
1	ЧТ	ЧТ+ЧВ	Плакорная	Слабовыпуклые суглинистые поверхности и склоны крутизной до 2°, хорошо дренированные, под пашней
2	ЧВ			
3	Лч	Лч	Плакорная	Плоские суглинистые, редко глинистые, слабодренируемые поверхности и неглубокие широкие западины с УГВ на 3 – 6 м, подстилаемые мореной, под пашней

4	Чл	Чл+Члвл	Полугидро- морфная	Недренируемые поверхности, обширные замкнутые понижения глубиной до 20 см с УГВ на 1 – 3 м, выполненные суглинками, редко глинами, подстилаемые мореной, под пашней
5	Члвл			
6	Л	Л	Плакорная	Выровненные песчаные и супесчаные надпойменные террасы с УГВ более 6 м, частично под пашней, частично под сосняками
7	Лпгэ	Лпгэ+Бл+Бт	Полугидро- морфная/ гидроморф- ная	Западины глубиной до 70 см с УГВ на 1 – 2 м, выполненные суглинками, подстилаемые мореной, частично под пашней, частично под влажными лугами
8	Бл			
9	Бт			
10	А ¹	А+Асл+Авл	Пойменная	Плоские и слабонаклонные поймы, суглинистые и супесчаные, с УГВ не ниже 1,5 м, под влажными лугами и пойменными лесами
11	Асл ²			
12	Авл ³			
13	Почвы ОБК	Почвы ОБК	Эрозионная	Овражно-балочные комплексы, выполненные суглинками, под влажными лугами и частично залесенные
14		Эродированн ые	Эрозионная, эрозионно- литогенная	Склоны крутизной 2 – 15 °, сложенные суглинками, местами с обнажениями мела и известняков, частично под пашней, частично под лугами

¹ – пойменные, ² – пойменные слоистые, ³ – пойменные влажнолуговые

Составление моделей почвенно-ландшафтных связей (ПЛС) с применением методов статистики и машинного обучения позволяет установить закономерности СФО

Матыро-Воронежского междуречья и прилегающих долин. Переменные, которые были определены как наиболее важные в детерминировании почвенного покрова в пределах междуречья, являются индикаторами перераспределения и накопления влаги: вертикальное расстояние до водотоков свидетельствует о дренированности; глубина замкнутых понижений – о накоплении влаги в западинах; относительные превышения/понижения в локальной окрестности – о мозаичности покрова и возможности задержания влаги в отрицательных формах благодаря соответствующему механическому составу отложений; тот же показатель, но в региональном масштабе – о перераспределении тепла и влаги на более крупных формах. В связи с этим можно говорить о главенствующей роли *водно-миграционных* процессов, которые определяют особенности СФО. Основным диагностическим показателем, отражающим результаты процессов функционирования, являются почвы возрастающего ряда гидроморфизма: от автоморфных черноземов до гидроморфных почв западин с застоем влаги во влажные сезоны. Кроме упомянутых переменных, несомненно, большое влияние оказывает глубина залегания грунтовых вод (ГВ), которое можно оценить количественно, зная его характерные значения в разных почвах.

Для речных долин водно-миграционная СФО важна в меньшей степени, поскольку на первое место выступают *эрозионно-аккумулятивные* процессы. Под их воздействием происходит формирование эродированных ландшафтов на склонах, развитие овражно-балочных систем (снос материала со склонов и накопление в днищах), аккумуляция отложений на поймах. Процессы аккумуляции в древности привели к появлению речных террас, которые в настоящее время контрастируют с соседними урочищами и находятся ближе к междуречьям по особенностям функционирования и структурным элементам.

Критерий сравнения	ЛДА	Ансамбль дерева решений (random forest)	Метод опорных векторов
Возможность задания априорной вероятности/веса	есть	нет	есть
Ранжирование переменных по значимости	Критерий Фишера	Индекс Джини	нет
МЕЖДУРЕЧЬЯ			
Общая точность, %	55.23 (53.05*)	56.47	60.57
Min точность, %	40.62 (почвы западин)	25 (Ч/почвы западин)	37.5 (Ч/почвы западин)
Разброс значений точности, %	46.75	66.58	55.13
Точность предсказания Лч, %	51.11 (52.81*)	76.67	71.11
Точность предсказания почв западин, %	40.63 (41.94*)	25	37.5
Положение типов местности в соответствии с данными почвенных карт			
Плакоры (Ч)	Ареал преувеличен (1**)	Ареал преувеличен (3**)	Ареал преувеличен (2**)
Слабодренлируемые междуречья (Лч)	Местами вытесняются плакорами, недренлируемыми междуречьями и поймами	Местами вытесняются плакорами	Местами вытесняются плакорами
Недренлируемые междуречья (Чл)	Местами вытесняют	Вытесняются слабодренлируемым и междуречьями	Местами вытесняют

	слабодренируемые междуречья		слабодренируемые междуречья
Западины (почвы западин)	Определены однозначно	Местами смещены, ошибочно предсказаны на недренируемых междуречьях	Ошибочно предсказаны в нижних частях плакоров
ДОЛИНЫ			
Общая точность, %	73.42	76.67	89.55
Min точность, %	52.94 (А) (33.33* - Л)	22.22 (Л)	22.22 (Л)
Разброс значений точности, %	34.3	72.17	72.17
Точность предсказания Л, %	66.67 (33.33*)	22.22	22.22
Точность предсказания Эр, %	62.5 (56.25*)	56.25	81.25
Положение типов местности в соответствии с данными почвенных карт			
Речные террасы (Л)	Ареал преувеличен	Местами вытесняют ОБК и поймы; вытесняются поймами, отсутствуют в долине Воронежа	Местами вытесняют ОБК и поймы; вытесняются поймами, отсутствуют в долине Воронежа
Поймы (А)	Местами ареал преувеличен, частично вытесняют ОБК; положение в пойме Матыры верное, в пойме Воронежа – недостаточное	Ошибочное размещение на террасах и слабодренируемых междуречьях; в пойме Воронежа практически выражены	Ошибочное размещение на террасах и слабодренируемых междуречьях; в пойме Воронежа не выражены

Склоны (Эр)	Местами не предсказаны	Местами предсказаны на месте других комплексов	Положение в целом верное
ОБК (почвы ОБК)	Часто вытесняются террасами и поймами	Положение верное; местами не предсказаны	Местами ареал преувеличен

*- точность предсказания почв без деления на категории междуречных и долинных; 1-3** - порядок по сокращению площади ареала (1 – максимально, 3 – минимально)

В качестве почв для сравнения формальной точности предсказания разными методами на междуречьях были выбраны Лч и почвы западин, поскольку первые занимают наибольшую площадь и повсеместно используются благодаря повышенному содержанию гумуса и дополнительному запасу влаги в течение летнего периода. Западины, напротив, обладают негативными водно-воздушными свойствами и осложняют хозяйственное использование, поэтому точность их предсказания весьма важна при практическом использовании. Как видно при сравнении, Лч наилучшим образом предсказаны при использовании метода random forest, что объясняется, вероятно, большим количеством точек в выборке. Точность западин максимальна при использовании ЛДА.

Среди почв долин интересно проследить различия в точности предсказания Л и Эр, т.к. выровненные участки НПТ с серыми лесными почвами могут потенциально использоваться в хозяйстве, а ареалы и площади Эр необходимо учитывать для предотвращения активизации эрозии и потери земель.

Помимо формальной оценки точности было произведено сравнение результатов с данными почвенных карт, имеющих на часть исследуемой территории. В долинах с ними лучше всего соотносятся ареалы ПК, полученные в результате ЛДА. В то же время положение контуров, предсказанных другими методами часто смещены или отсутствуют, несмотря на более высокие формальные значения. На междуречьях тоже прослеживается ряд неточностей, связанный с размещением типов местности и их площадным соотношением. Как и в случае долин, наибольшая достоверность получена при использовании метода ЛДА.

Заключение

Современные методы статистики и алгоритмов машинного обучения предоставляют широкий спектр возможностей для изучения особенностей СФО. Её реализация посредством установления почвенно-ландшафтных связей направлена на установление систематизированных представлений об организации ландшафтного покрова, что позволяет формализовать экспертные знания о территории.

Для ключевого участка лесостепи в пределах Окско-Донской низменности были составлены модели почвенно-ландшафтных связей с помощью трех методов (линейного дискриминантного анализа, ансамбля дерева решений и метода опорных векторов), на основании которых оценивался вклад индивидуального и совокупного вклада независимых факторов в объяснение структуры территории. Разделение обучающей выборки на две категории – почв междуречья и почв долин – позволил подтвердить гипотезу о действии разных факторов на формирование ландшафтной структуры, что особенно хорошо прослеживается при использовании метода ЛДА. Пространственная дифференциация описывается с точностью от 55 до 61% на междуречьях и от 73 до 89% в долинах (метод ЛДА и опорных векторов соответственно). Точность предсказания после разделения выборки в среднем возросла на 15%. Несмотря на формальные показатели высокой точности, полученных методами ансамбля деревьев решений и опорных векторов, экспертные знания о территории и верификация по почвенным картам позволяют говорить о более высоком качестве модели при использовании ЛДА. Это связано и с контрастным набором переменных для междуречья и долин, и с возможностями тонкой настройки. На основании составленных моделей получены карты структур почвенного покрова, соответствующие рангу типов местности, и карты неопределенности моделирования.

Главная причина неопределенности почвенно-ландшафтных связей – комплексность почвенного покрова, обусловленная перераспределением влаги по элементам микро- и мезорельефа. Полученные результаты с использованием серии методов заставляют задуматься о продолжении поиска наиболее оптимальных переменных и еще более тонкой настройке моделей, чтобы при максимальной точности были достигнуты хорошие результаты экспертно-визуальной оценки. Не исключено, что в дальнейшем в моделирование необходимо включить

литологический состав, характер четвертичных отложений, показатели биомассы и продуктивности и глубину залегания грунтовых вод, рассчитанную для каждого пиксела. Тем не менее, результаты подобных исследований используются на стадии проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия [1].

В результате проделанной работы удалось выявить иерархический характер структурно-функциональной организации. Первый уровень составляют структуры междуречий и долин. В них функционирование определяется водно-миграционными (формирование бессточных областей, дренируемость территории) и эрозионно-аккумулятивными (перераспределение тепла и влаги, скорость латерального переноса вещества) процессами соответственно. Далее на втором уровне в пределах междуречий выделяются следующие структуры: недренируемые и слабодренируемые поверхности, выпуклые плакоры и западины, которые индицируются благодаря формированию почв разной степени гидроморфизма. Процессы функционирования для каждой категории становится возможным детализировать. Так, в пределах слабодренируемых и недренируемых междуречий важнейшую роль играет сезонная динамика грунтовых вод и перераспределение влаги по элементам микрорельефа; на плакорах – гумусонакопление в сочетании с выщелачиванием карбонатов; в западинах – накопление избыточной влаги с выщележащих элементов рельефа, динамика грунтовых вод и суффозия. В свою очередь, в долинах на втором иерархическом уровне выделяются структуры пойм, террас, склонов и овражно-балочной сети. Процессы, определяющие функционирование данных комплексов, следующие: на склонах – скорость и интенсивность латерального переноса вещества; в овражно-балочных комплексах – снос материала со склонов и накопление в днищах; на поймах – перемещение и аккумуляция отложений, сезонное затопление; на террасах – гумусонакопление и сезонная динамика грунтовых вод. Составленные модели применимы для физико-географической провинции низменных моренно-эрозионных равнин в области донского оледенения с покровными слабокарбонатными суглинками [16].

Таким образом, основные выводы можно сформулировать в следующем виде:

1. На основе анализа производных морфометрических характеристик рельефа и данных полевых почвенных описаний (256 точек) создана региональная

модель почвенно-ландшафтных связей, точность которой составила 53.1%. Наиболее значимыми факторами, выявленными в процессе линейного дискриминантного анализа, стали крутизна поверхности, вертикальное расстояние до водотоков, глубина долин и замкнутых понижений, т.е. факторы, отвечающие за глобальное перераспределение влаги и интенсивность эрозионных процессов. В результате моделирования были хорошо разделены почвы плакоров, недренируемых междуречий и овражно-балочных комплексов, но хуже — почвы террас и западин, важных при агрохозяйственном планировании.

2. Для улучшения точности моделирования проведен анализ структурной организации территории за счет деления ее на два класса - междуречных комплексов и долинных. Дальнейшее моделирование проводилось внутри каждого класса. При использовании линейного дискриминантного анализа для междуречий наиболее важными факторами дифференциации стали: вертикальное расстояние до водотоков, глубина замкнутых понижений и относительные превышения в локальной окрестности (100 пикселей); для долин — это крутизна поверхности и относительные превышения в локальной и глобальной окрестности (200 и 1900 пикселей). Точность составила 55.2% и 73.4% соответственно.
3. При использовании метода опорных векторов и random forest важнейшими факторами дифференциации в пределах междуречья стали относительное превышение в глобальной окрестности (2100 пикселей), вертикальное расстояние до водотоков, крутизна и индекс долин; в долинах — вертикальное расстояние до водотоков, глубина долин, крутизна и относительные превышения в окрестности 2100 пикселей.
4. Проведено сравнение точности моделирования тремя способами: линейного дискриминантного анализа, опорных векторов и random forest. Наиболее высокая точность в категории почв междуречья и долин достигается при использовании метода опорных векторов (60.6% и 90% соответственно).
5. Для целей агрохозяйственного планирования наиболее важным представляется выделение гидроморфных почв западин и полугидроморфных недренируемых междуречий на фоне плакорных черноземов и

черноземовидных почв. С задачей выделения первой категории лучше справился метод линейного дискриминантного анализа (40.6% и 47.6%), в то время как со второй — метод опорных векторов (37.5% и 71.1%).

6. Результаты работы показали, что учет структурной организации территории на более высоком иерархическом уровне помогает с большей точностью предсказать интенсивность элементарных почво- и ландшафтообразующих процессов выделить и структурную организацию территории на более низком уровне.
7. Установлено, что на междуречьях основную роль играют водно-миграционные процессы, определяющие накопление и перераспределение влаги и приводящие к формированию слабо- и недренируемых поверхностей и комплекса западин, в то время как в долинах структуру и функционирование ландшафтов определяют эрозионно-аккумулятивные процессы, выраженные в формировании овражно-балочных комплексов, пойм и склонов.

Список литературы

- 1) Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Методическое руководство. Под ред. В.И.Кирюшина, А.Л.Иванова, ФГНУ «Росинформагротех», М., 2005. 761 с.
- 2) Арманд Д. Л. Наука о ландшафте: (Основы теории и логико-математические методы). — М.: Мысль, 1975. — 288 с. — 7 000 экз. (в пер.)
- 3) Ахтырцев А.Б. Гидроморфные почвы и переувлажненные земли лесостепи русской равнины. Автореф. дис. ... докт. биол. н. Воронеж, 1999.
- 4) Базилевич Н. И., Гребенщиков О. С., Тишков А. А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. — М.: Наука, 1986. — 296 с.
- 5) Бараев А.И. и др. Почвозащитное земледелие – М.: Колос, 1975, 304 с.
- 6) Васенев И.И., Васенева Э.Г. Перспективы использования цифровых почвенных карт и специализированных систем поддержки принятия решений для агроэкологической оптимизации земледелия в условиях Центрально-Черноземного региона России // Цифровая почв. картография: теорет. и эксперим. исслед. / Почв. ин-т им. В. В. Докучаева. - Москва, 2012. - С. 155-176

- 7) Герасимов И.П. Опыт генетической диагностики почв СССР на основе элементарных почвенных процессов // Почвоведение, 1975. № 5
- 8) Глинка К. Д. Почвоведение. СПб.: изд. А. Ф. Девриена, 1908. XI, 596 с.; 2-е изд. Пг., 1915. XIX, 708 с. ; 3-е изд. М.: «Новая деревня», 1927. 580 с. ; 4-е изд. М.; Л.: Сельколхозгиз, 1931. 612 с.; 5-е изд. 1932. 602 с. ; 6-е изд. 1935. 631 с
- 9) Гродзинский М.Д. Історія ландшафтної екології як Гродзинський М.Д. її самоорганізація // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия “География”. Т. (63). 2011. № 1. С.15–25.
- 10) Девятова Т.А. Изменение почвенного покрова и свойств почв по элементам рельефа балочных водосборов Воронежской области [Электронный ресурс] / Девятова, Божко // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация .— 2012 .— №1 .— С. 75-81 .— Режим доступа: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/chembio/2012/01/2012-01-14.pdf>
- 11) Докучаев В.В. Доклад профессора В.В. Докучаева Закавказскому статистическому комитету об оценке земель вообще и Закавказья, в особенности: Почв., горизонт. и вертикал. зоны. - Тифлис: тип. Канц. главнонач. гражд. ч. на Кавказе, 1899. - [2], 19 с.; 23.
- 12) Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь – СПб., 1892.
- 13) Дьяконов К. Н., Линник В. Г. некоторые проблемы науки о ландшафте XXI века // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития : материалы XII Международной ландшафтной конференции, Тюмень-Тобольск, 22-25 августа 2017 г. : в 3 т / Под ред. К. Н. Дьяконов, К. Н. Дьяконов, К. А. Мерекалова, Т. И. Харитонова. — Т. 1. — Издательство Тюменского государственного университета Тюмень, 2017. — С. 19–24.
- 14) Жукова Ю. А., Булгаков Д. С., Козлов Д. Н. Оценка агроэкологического потенциала на примере белгородской области // Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования: сборник материалов научной конференции, посвященной 80-летию кафедры почвоведения и управления земельными ресурсами. — Издательско-полиграфический центр Научная книга Воронеж, 2017. — С. 359–363.

- 15) Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б., Красина Т.В. Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения. Способы защиты и мелиорации. Воронеж: Кварта, 2013. 352 с.
- 16) Исаченко А.Г. Ландшафты СССР. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. — 320 с.
- 17) Карандеева М.В. Геоморфология Европейской части СССР [Текст]: учеб. пособие для ун-тов/ М.В. Карандеева. — Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1957. — 314 с.
- 18) Кирюшин В.И. Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирование агроландшафтов. - М.: КолосС, 2013. - 443 с., [12] л. ил.: ил.
- 19) Кирюшин В.И. Экологические основы земледелия – М.: Колос, 1996, 366 с.
- 20) Классификация и диагностика почв СССР. М., К 47 «Колос», 1977
- 21) Козлов Д. Н., Лозбенев Н. И., Левченко Е. А. Структурно-функциональная организация водно-миграционных и эрозионно-аккумулятивных комплексов лесостепи Среднерусской возвышенности // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития [Электронный ресурс]: материалы XII Международной ландшафтной конференции, Тюмень-Тобольск, 22-25 августа 2017 г. — Т. 1. — Тюменского государственного университета Тюмень, 2017. — С. 71–76.
- 22) Козлов Д. Н., Сорокина Н. П. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. Сборник статей.- М.: Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 2012.- 35-57 с.
- 23) Козловский Ф.И. Теория и методы изучения почвенного покрова. М.: ГЕОС, 2003 – 534 с.
- 24) Кошель С. М. Моделирование рельефа по изолиниям // Университетская школа географической картографии. К 100-летию профессора К.А.Салищева (ред. Берлянт А.М.). — Аспект Пресс Москва, 2005. — С. 198–208.
- 25) Крауклис А. А. Применение организационных принципов в физической географии // Методологические вопросы географии. — Иркутск, 1977. — С. 36–50.
- 26) Леонова Г. М. Вклад морфометрических характеристик рельефа в варьирование почвенного и растительного покрова заповедных лесостепных ландшафтов Южного Урала // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития : материалы XII

- Международной ландшафтной конференции, Тюмень-Тобольск, 22-25 августа 2017 г. : в 3 т / Под ред. К. Н. Дьяконов, К. Н. Дьяконов, К. А. Мерекалова, Т. И. Харитонов. — Т. 1. — Издательство Тюменского государственного университета Тюмень, 2017. — С. 79–83.
- 27)Макунина Г.С. Три составляющие системной организации ландшафта в концепциях Ф.И. Козловского, А.А. Крауклиса и В.Н. Солнцева // География и природные ресурсы, 2010, №1, с. 18- 23.
- 28)Мильков, Ф.Н. Окско-Донское плоскоместье. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1976. – 176 с.
- 29)Мильков Ф. Н. Типы местности и ландшафтные районы Центральных черноземных областей // Изв. ВГО. — 1954. — Т. 86. Вып. 4. — С. 336—346.
- 30)Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа / Д. Н. Козлов, М. Ю. Пузаченко, М. В. Федяева, Ю. Г. Пузаченко // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2008. — № 4. — С. 112–124.
- 31)Прянишников Д.Н. Избранные сочинения, т. 1-3. М., 1963.
- 32)Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях: Учеб. пособие для студ. вузов / Юрий Георгиевич Пузаченко.- М.: Издательский центр "Академия", 2004.- 416 с.
- 33)Ретеюм А.Ю. Физико-географическое районирование и выделение геосистем // Вопросы географии, сб. 98, М.: Наука, 1975
- 34)Раскатов Г.И. Геоморфология и неотектоника территории Воронежской антеклизы [Текст]/ Г.И. Раскатов. - [Воронеж]: Изд-во Воронеж. ун-та, [1969]. - 164 с.
- 35)Самойлова Е.М. Луговые почвы лесостепи. Изд-во Моск.ун-та. 1981. 284 с.
- 36)Самойлова Е.М., Макеева В.И. Черноземно-луговые почвы и их диагностика. //Почвоведение. 1979. №12. С. 16-22.
- 37)Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и её применение. — Томск: Изд-во Томского университета, 2002. — 128 с. — ISBN 5-7511-1501-5.
- 38)Солнцев В. Н. Системная организация ландшафтов (проблемы методологии и теории). — М.: Мысль, 1981. — 239 с.
- 39)Солнцев Н. А. Учение о ландшафте: Избранные труды. — М.: Изд-во МГУ, 2001. — 383 с.

- 40) Сорокина Н. П., Козлов Д. Н. Методы цифровой почвенной картографии в задачах агроэкологической оценки земель // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования / Под ред. А. Л. Иванов, М. Конюшкова, Ю. Л. Мешалкина и др. — Почвенный ин-т имени В.В. Докучаева Москва, 2012. — С. 140–154.
- 41) Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах / В. Б. Сочава. — Новосибирск: Наука, 1978 — 319 с.
- 42) Сочава В. Б. Определение некоторых понятий и терминов физической географии // Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока. — 1963 — Вып. 3 — С. 50–59.
- 43) Спиридонов А.И. Геоморфология Европейской части СССР [Текст]: учеб. пособие для геогр. спец. ун-тов/А.И. Спиридонов. — М.: Высшая школа, 1978. — 335 с.: ил.: ил. — Список лит.: с. 331-332. — Б. ц.
- 44) Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ., /Джон Ким, Ч.У.Мьюллер и др. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 215с
- 45) Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М., 1972.
- 46) Хорошев А. В., Алещенко Г. М. Иерархическая организация межкомпонентных связей в ландшафте // Vestnik Moskovskogo Unviersiteta, Seriya Geografiya. — 2012. — Т. 5, № 3. — С. 25–32.
- 47) Хорошев А. В. Современные направления структурного ландшафтоведения // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2016. — № 3. — С. 7–15.
- 48) Яцухно, В.М., Бакарасов, В.А. Подходы к изучению территориальных структур ландшафтов для оптимизации природопользования [Электронный ресурс]/ В.М. Яцухно// Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География. - 2013. - №2. - С. 70-75. — Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/97842>
- 49) Breiman, Leo. Random Forests (англ.) // :en:Machine Learning (journal)|Machine Learning : journal. — 2001. — Vol. 45, no. 1. — P. 5—32.
- 50) Douglas D.H. Collected Algorithms // Paper No.20, Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, Graduate School of Design, Harvard University, 1974.
- 51) Ecological-hydrological and genetic features of the soils of the tambov plain / F. R. Zaidelman, A. S. Nikiforova, L. V. Stepantsova et al. // Eurasian Soil Science. — 2014. — Vol. 47, no. 4. — P. 223–235.

- 52) Fisher, R.A. Statistical Methods and Scientific Inference. Edinburgh: Oliver & Boyd. 1956.
- 53) Fisher, R.A. The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems // Annals of Eugenics. — 1936 T. 7. — C. 179-188.
- 54) Gorte B.G.H., Koolhoven W. Interpolation between isolines based on the Borgefors distance transform // ITC Journal, 1990, 3, pp.245-247
- 55) Hofierka, J., Knutova, M., 2015, Simulating aspects of a flash flood using the Monte Carlo method and GRASS GIS: a case study of the Malá Svinka Basin (Slovakia), Open Geosciences. Volume 7, Issue 1, ISSN (Online) 2391-5447, DOI: [10.1515/geo-2015-0013](https://doi.org/10.1515/geo-2015-0013), April 2015
- 56) Hofierka, J., Mitasova, H., Mitas, L., 2002. GRASS and modeling landscape processes using duality between particles and fields. Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference 2002 - Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- 57) Hutchinson M.F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models // Third International Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, NCGIA, 1996, University of California, Santa Barbara
- 58) Hutcheson, G. D. Ordinary Least-Squares Regression. In L. Moutinho and G. D. Hutcheson, The SAGE Dictionary of Quantitative Management Research, 2011. Pages 224-228.
- 59) Jenny H. Factors of Soil Formation. A system of Quantitative Pedology. – New York: McGraw Hill, 1941. - 281 p.
- 60) Koshel S., Kalinkin I. Surface modeling for contour data // Proc. of Int. Conference GIS Frontiers in Business and Science, April 20-24, Brno, Czech Republic. — Vol. 2. — Brno, Czech Republic, 1996. — P. 2–5.
- 61) Koshel S, 2012, Algorithm for topologically correct gridding of contour data. In: Proceedings of Seventh International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2012), Columbus, Ohio, 1-5.
- 62) Kozlov D.N., Levchenko E.A., Lozbenev N.I. (2018) Soil combinations as an object of DSM: a case study in chernozems area of the Russian Plain // Arrouays, D. (Ed.), Savin, I. (Ed.), Leenaars, J. (Ed.), McBratney, A. (Ed.). (2018). GlobalSoilMap - Digital Soil Mapping from Country to Globe. London: CRC Press. p.81-88.

- 63) Krige, Danie G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa*, 1951. 52(6): 119–139.
- 64) McBratney. A.B., Mendonça Santos. M.L., Minasny. B. On digital soil mapping // *Geoderma*. - 2003. – Vol. 117. - № 1-2. – P. 3–52.
- 65) M. D. Buhmann. *Radial Basis Functions: Theory and Implementations*.- Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- 66) Mitasova, H., Thaxton, C., Hofierka, J., McLaughlin, R., Moore, A., Mitas L., 2004, Path sampling method for modeling overland water flow, sediment transport and short term terrain evolution in Open Source GIS. In: C.T. Miller, M.W. Farthing, V.G. Gray, G.F. Pinder eds., *Proceedings of the XVth International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR XV)*, June 13-17 2004, Chapel Hill, NC, USA, Elsevier, pp. 1479-1490.
- 67) Olea, Ricardo A. (1999). *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*. Kluwer Academic
- 68) Shary, P.A., Sharaya, L.S., Mitusov, A.V. *Fundamental Quantitative Methods of Land Surface Analysis*. *Geoderma*.- 2002.-№ 107. P. 1-32.
- 69) Thaxton C.S., Mitas L., Mitasova H., McLaughlin. Simulations of distributed watershed erosion, deposition, and terrain evolution using a path sampling Monte Carlo method. Conference: Ottawa, Canada August 1 - 4, 2004.
- 70) Vapnik V.N. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, 1995
- 71) Zevenbergen L.W, Thorne C.R. Quantitative analysis of land surface topography//Zevenbergen, Thorne//*Earth surface processes and forms*.- 1987.- vol. 12.- 47-56.
- 72) Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [электронный ресурс]// URL: <http://egrpr.esoil.ru/>. (Дата обращения: 19.10.2019)
- 73) Климатические данные городов по всему миру [электронный ресурс]// URL: <https://ru.climate-data.org/>. (Дата обращения: 18.10.2019)
- 74) Моделирование ПЛС в среде R [Электронный ресурс]. URL: http://landscapeedu.ru/files/edu/R_DSM_sid_v0.99.pdf. (Дата обращения: 09.03.2020)
- 75) Пакет оперативной геологической информации (ГИС-Атлас) [Электронный ресурс]. URL: <http://atlaspacket.vsegei.ru>. (Дата обращения: 10.11.19)

- 76) Расписание погоды [электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/>. (Дата обращения: 18.10.2019)
- 77) Электронная версия Национального атласа почв Российской Федерации [электронные ресурсы]. URL: <https://soilatlas.ru/>. (Дата обращения: 19.10.2019)
- 78) docs.qgis.org [Электронный ресурс]. URL: https://docs.qgis.org/2.8/ru/docs/user_manual/processing_algs/saga/terrain_analysis_morphometry.html. (Дата обращения: 20.01.2020)
- 79) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecmwf.int/>. (Дата обращения: 18.10.2019)
- 80) gis-lab.info [Электронный ресурс]. URL: <https://gis-lab.info/>. (Дата обращения: 17.04.2020)
- 81) habr.com [электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/>. (Дата обращения: 30.10.2019)
- 82) Open data science [электронный ресурс]. URL: <https://ods.ai/>. (Дата обращения: 30.10.2019)
- 83) Surfer help [Электронный ресурс]. URL: <http://surferhelp.goldensoftware.com>. (Дата обращения: 17.04.2020)