

Докучаев Павел Михайлович

**ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ПОЧВЕННОЙ КАРТЫ И КАРТОГРАММЫ УГЛЕРОДА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЦИФРОВОГО ПОЧВЕННОГО
КАРТОГРАФИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ВЯТСКО-КАМСКОЙ ПРОВИНЦИИ
ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ЮЖНОЙ ТАЙГИ)**

03.02.13 – почвоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре общего земледелия и агроэкологии факультета почвоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

Мешалкина Юлия Львовна, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник кафедры общего земледелия и агроэкологии факультета почвоведения ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

Мищенко Наталья Владимировна, доктор биологических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО “Владимирского государственного им. А.Г. и Н.Г. Столетовых”.

Гиниятуллин Камиль Гашикович, кандидат биологических наук, доцент института экологии и природопользования ФГАОУ ВПО “Казанский (Приволжский) федеральный университет”.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Вятский государственный университет".

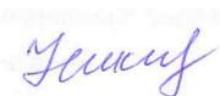
Защита состоится 31 мая 2017 г. в 11 часов 00 минут в аудитории ____ на заседании диссертационного совета Д 501.001.57 при ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 12, МГУ имени М. В. Ломоносова, факультет почвоведения.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, 27, отдел диссертаций) и на сайтах: <http://istina.msu.ru/dissertations/47983966/>
<http://soil.msu.ru/nauka/uchenyj-sovet/2573-dokychaev>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 12, МГУ имени М. В. Ломоносова, факультет почвоведения, Ученый совет

Автореферат разослан _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Никифорова Алла Сергеевна

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Почвенная карта является основным научным документом, на базе которого возможна грамотная оценка земельных фондов, а также разработка системы практических мероприятий, направленных на повышение плодородия почв. Важнейшим условием для ведения рационального сельского хозяйства является обновление устаревших почвенных карт и актуализация информации о состоянии и свойствах почвенного покрова. В то же время проведение крупномасштабного почвенного картографирования традиционным путем на всю территорию России не представляется возможным из-за больших трудозатрат на полевые исследования и ограниченного числа специалистов. Применение методов цифровой почвенной картографии (ЦПК) может стать одним из решений этой проблемы. Перспективным средством обновления старых почвенных карт хозяйств является сочетание современных компьютерных технологий (McBratney и др., 2003; Симакова, Савин, 1998; Козлов, Сорокина, 2012; Хитров, 2012) и грамотного полевого обследования изучаемой территории (Сорокина, 2006; Ульянова, Зборищук, 2005).

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования определяется объективной необходимостью разработки подходов к крупномасштабному картографированию почвенных свойств и анализа возможностей моделирования почвенного покрова средствами цифровой почвенной картографии.

Цель работы - провести крупномасштабное почвенное картографирование территории хозяйства, представительного для Вятско-Камской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги методами ЦПК, а также оценить запасы гумуса в верхних 20 см сельскохозяйственных угодий.

Задачи исследования:

1. Выбор района исследования и построение традиционной почвенной карты на эту территорию.
2. Создание цифровых почвенных карт на основе 5 алгоритмов и проверка моделей на устойчивость: 1) множественная логистическая регрессия, 2) деревья решений C5, 3) метод случайного леса, 4) регрессионные деревья, 5) метод опорных векторов.
3. Сравнение полученных цифровых карт с почвенной картой.
4. Проверка построенных карт по случайной независимой выборке.
5. Построение картограммы запасов гумуса сельскохозяйственных полей и оценка точности предсказания.

Научная новизна. Впервые в отечественном почвоведении проведена сравнительная характеристика результатов моделирования пространственного распределения почв на основе пяти алгоритмов ЦПК: 1) множественная логистическая регрессия, 2) деревья решений C5, 3) метод случайного леса, 4) регрессионные деревья, 5) метод опорных векторов, - созданы картографические модели, проверена их устойчивость и проведено сравнение с традиционной почвенной картой. Показано, что цифровые почвенные карты, построенные на основе моделей деревьев решений и регрессионных деревьев, более схожи с почвенной картой, построенной традиционным методом.

Впервые для территории хозяйства, типичного для Вятско-Камской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги, выявлен минимальный набор факторно-индикационных переменных (ковариат), позволяющий использовать цифровые модели для построения почвенных карт.

Впервые в отечественной науке проиллюстрирован тот факт, что в результате применения алгоритмов ЦПК порождается набор картографических моделей на одну территорию и показано, что в большинстве случаев лучшие результаты с точки зрения эксперта - почвовед будут

показывать средние по устойчивости модели. Впервые на исследуемую территорию создана картограмма запасов гумуса в верхнем слое 0-20 см (масштаба 1:50 000) и обоснован алгоритм построения картограммы запасов гумуса, позволяющий снизить ошибку предсказания примерно в два раза.

Впервые с 1984 г. была составлена почвенная карта масштаба 1:50 000 на территорию хозяйства Чура Глазовского района Удмуртской Республики.

Практическая значимость. Работа имеет практическую ценность с методической точки зрения. Разработанные подходы могут использоваться как методическое обоснование для почвенного картографирования схожих по почвенно-геоморфологическим условиям территорий Вятско-Камской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги. Показано, что для данной территории все алгоритмы с высокой степенью точности выделяют контура дерново-подзолистых слабосмытых и среднесмытых почв, а также с достаточной точностью выделяются аллювиальные, дерново-глеевые, дерново-подзолистые намывные и несмытые почвы. Хуже всего пространственному моделированию методами ЦПК поддаются светло-серые лесные и дерново-подзолистые сильносмытые почвы.

Полученные почвенные карты и картограмма запасов гумуса могут быть использованы как основа для создания прикладных карт агроэкологического назначения, могут использоваться для грамотного планирования проведения сельскохозяйственных работ на исследуемой территории.

Составленные картографические материалы также могут являться основой для оценки почвенных рисков и моделирования сценариев развития окружающей среды для территории исследования.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследования были представлены автором в виде устных докладов на 5 конференциях: на XVI и XVIII Докучаевских молодежных чтениях (Санкт-Петербург, 2013 и 2015 гг.), Ломоносов (Москва, 2013 и 2015 гг.), VII съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с международным участием научной конференции Почвоведение-продовольственной и экологической безопасности страны (Белгород, 2016 г.). Работа прошла апробацию на кафедре общего земледелия и агроэкологии МГУ им. М.В. Ломоносова.

Публикации. По результатам проведенных научных исследований опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах списка ВАК.

Личный вклад автора. Автором было проведено обобщение литературных материалов, автор участвовал в организации и проведении полевых работ (2014-2016 гг.), лично проводил пробоподготовку, статистический анализ полученных материалов, построение пространственных моделей, обобщение и интерпретация полученных результатов. Автор лично представлял результаты исследований на научных мероприятиях, перечисленных выше.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы и 5 приложений. Она изложена на 186 страницах, содержит 28 таблиц и 48 рисунков. Список литературы включает 243 наименования, в том числе 162 на иностранных языках.

Благодарности. Автор глубоко признателен руководству кафедры общего земледелия и агроэкологии факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова за предоставленную возможность проведения исследований по теме диссертации.

Автор благодарит научного руководителя к. с-х. н. Ю.Л. Мешалкину за внимательное отношение и помощь на всех этапах работы. Автор выражает искреннюю благодарность за ценные советы и плодотворную консультацию в различных вопросах своим учителям и коллегам В.П. Самсоновой, И.А. Мартыненко, Т.Ю. Ульяновой.

Автор благодарен руководству ФГБНУ Почвенного института имени В.В. Докучаева за возможность освоения методов цифровой почвенной картографии в ходе Школы молодых ученых; а также сотрудников лаборатории Биологии и биохимии почв за помощь в проведении анализов почвенных образцов на содержание гумуса и А.В. Юдиной за помощь в проведении анализов гранулометрического состава образцов.

Особую благодарность автор выражает своим родным и близким за моральную поддержку и помощь в проведении работ, а также руководству хозяйства ООО «Чура» в лице директора А.М. Першина и сотрудникам хозяйства за предоставленную возможность работы на полях хозяйства и информацию об особенностях почвенного покрова и сельскохозяйственной деятельности. Исследование было частично поддержано грантом Российского Научного Фонда № 15-16-30007.

Содержание работы

Глава 1. Обзор научной литературы

Почвенно-климатические условия севера Удмуртской Республики типичны для восточной части Восточно-Европейской равнины, бассейнов рек Кама и Вятка (Ногина, 1962; Пермьяков, 1972), а почвенный покров имеет сложный генезис и является объектом неоднократных рекогносцировочных, почвенно-агрохимических и других научных исследований (Прокашев, 2003; Жуйкова и др., 2000; Вологжанина, 1984; Ковриго, 2004). Итогом многолетних почвенных исследований середины и конца XX века стало составление подробной почвенной карты Удмуртской Республики масштаба 1:200 000 (Почвенная карта ..., 1990) и карт хозяйств, составленных специалистами Гипрозема.

В основе ЦПК (McBratney и др., 2003) лежит развитие идей В.В. Докучаева (Флоринский, 2012), которые выражены в модели SCORPAN. Эта модель рассматривает классификационную принадлежность почв и почвенных свойств как функцию от факторов почвообразования и/или индикаторов. Факторно-индикационные переменные в ЦПК часто называют ковариатами (далее будем пользоваться этим термином). Информация о ковариатах может быть получена из различных источников: например, это могут быть данные дистанционного зондирования (New и др., 2001; Mulder, 2011; Кирьянова, Савин, 2012; Кренке, 2012; Самсонова, Мешалкина, 2012), старые почвенные карты и материалы обследований (Maug и др., 2010; Dobos и др., 2010; Рухович и др., 2012), цифровые модели рельефа (Shary и др., 2002; Florinsky, 2011), данные, полученные путем измерения электрических, гравитационных, магнитных и электромагнитных полей (Huang и др., 2014; Buchanan, Triantafylis, 2009) и т.п.

Картографирование пространственного распределения почв в ЦПК реализуется на основе алгоритмов, специально разработанных для этих целей или используемых для математического решения целого ряда других задач (Lagacherie, McBratney, 2007). Суть двух алгоритмов: **метода множественной логистической регрессии** (Kempen и др., 2009; Brungard и др., 2015) и **метода опорных векторов** (Simin и др., 2010; Lamorski и др., 2008) заключается в создании для каждой точки раstra на основании переменных-предсказателей вектора вероятностей нахождения там того или иного класса почвы (Kempen и др., 2009). Различие заключается в математических функциях, применяемых для построения векторов вероятностей. В основе алгоритмов: **деревья решений** (Connolly и др. 2007; Brungard и др., 2015), **метод случайного леса** (Barthold и др., 2013; Brungard и др., 2015) и **регрессионные деревья** (Lemercier и др., 2012; Schmidt и др., 2008) лежат, так называемые, деревья принятия решений. В каждом узле таких деревьев формируются классифицирующие правила, в соответствии с которыми дерево принятия решений относит ту или иную точку к тому или иному классу (Quinlan, 1993). Различия алгоритмов заключаются в количестве строящихся деревьев принятия решений: для алгоритма деревьев решений строится

одно дерево, а для алгоритма метода случайного леса и регрессионных деревьев – большое их количество.

Процесс картографирования можно описать следующим образом. Сначала формируется обучающая выборка, где для каждой известной точки земной поверхности указаны классификационная принадлежность почвы, а также значения факторов почвообразования и ковариат. На основе обучающей выборки строится картографическая модель на изучаемую территорию. Картографическая модель может быть выражена в решающих правилах или в виде оценок коэффициентов в уравнении, в зависимости от выбранного классификационного алгоритма, задающего пространственную структуру многомерного пространства. Затем проводится диагностика классификационной принадлежности почв на всей изучаемой территории при помощи построенной картографической модели и на основе данных о факторах почвообразования и индикаторах.

Главной особенностью ЦПК является проверка устойчивости картографических моделей, полученных по обучающей выборке, а также проверка точности предсказания по независимой случайной выборке. В результате каждая карта, полученная ЦПК, характеризуется степенью неопределенности предсказания.

Оценить точность почвенной карты, построенной традиционными методами, можно на основе подходов, разработанных Н.П. Сорокиной (Сорокина, 2006).

Для вероятностной оценки совпадения почвенных карт друг с другом или с некоторым эталоном в ЦПК используются понятия *общей точности* и величины *каппа* (Самсонова, Мешалкина, 2011; Hengl и др., 2007). Пусть имеются две карты, на которых выделены контура с использованием одной и той же классификации. Если на обе карты нанести одинаковые точки, выбранные случайно, то отношение общего количества одинаково классифицированных точек к общему количеству сравниваемых точек (доля совпадения) называется общей точностью и характеризует вероятности отнесения точек к одной и той же условной почвенной группе. Общая точность обычно выражается в процентах.

Сходным по сути с общей точностью является безразмерный коэффициент каппа. Каппа – это отношение общей точности модели и единицы, из которых были вычтены вероятности, обусловленные случаем. Оценка каппа рассчитывается по формуле:

$$\hat{\kappa} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2}, \quad \text{где } \theta_1 - \text{общая точность, а } \theta_2 - \text{точность, обусловленная случаем.}$$

Каппа равняется 1 при полном совпадении двух карт, то есть если все проверочные точки были классифицированы одинаково. Каппа равна 0, если наблюдается чисто случайное совпадение. В большинстве случаев каппа лежит от 0 до 1.

Картограммы пространственного распределения запасов гумуса в почвах необходимы для решения целого ряда практических вопросов на уровне хозяйств, для изучения почвенного плодородия и пространственных закономерностей распределения органического вещества (Mendonça-Santos и др., 2010; Grimm и др., 2008; Sidorova, Krasilnikov, 2007; Кузяков, Кузякова, 1997). Для построения картограмм отдельных почвенных свойств обычно используют геостатистические методы (Aksoy и др., 2012; Сидорова, 2011; Самсонова, 2008; Гиниятуллин и др., 2016), среди которых регрессионный кригинг показывает лучшие результаты при проверке точности получаемого картографического материала (Zhao, Shi, 2010; Marchetti и др., 2010; Mendonça-Santos и др., 2010).

Глава 2. Объекты и методы

Характеристика объекта исследований. Ключевой участок находится в 8 км юго-западнее г. Глазова, который располагается на севере Удмуртской Республики и принадлежит Вятско-Камской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги (рис.1, А). Протяженность участка с севера на юг – 4,5 км, а с запада на восток – 5,2 км. Климат - умеренно-континентальный, коэффициент увлажнения - 1,00-1,33. Естественная растительность севера Удмуртии входит в северо-западную геоботаническую зону и представлена в основном пихтово-еловыми и темными сосновыми лесами со значительной примесью березы (Ефимова и др., 1972).

Следующие особенности позволяют считать территорию исследуемого участка представительной для Вятско-Камской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги (Добровольский, Урусевская, 2004; Подсосова, 1972): 1) самыми распространенными почвами на исследуемой территории являются дерново-неглубокоподзолистые и дерново-глубокоподзолистые почвы, представленные в основном смытыми категориями; 2) территория ключевого участка сильно расчленена овражно-балочной сетью, между которой располагаются пологие увалы; 3) ключевой участок однороден по почвообразующим породам и располагается на тяжелосуглинистых бескарбонатных покровных красновато-бурых суглинках водно-ледникового происхождения, что приводит к тому, что гранулометрический состав почв на исследуемой территории преимущественно средне- и тяжелосуглинистый.

Леса занимают 24 % от площади исследуемого участка, пойменные луга - около 5 %. Антропогенное влияние здесь значительно: 65 % территории занимают пашни, 5 % - сенокосы, 6 % - приусадебные участки д. Кыпка (рис.1, Б).

Для работы были подобраны следующие материалы: 1) почвенная карта, выполненная в 1984 году специалистами Уралгипрозема (рис. 2). Согласно этой карте на территории представлены 4 типа почв и 19 их разновидностей; 2) топографическая карта масштаба 1 : 50 000; 3) космический снимок сверхвысокого разрешения WorldView-1 от 15.09.2015 г. (рис.1, А).

Схема работы состояла в следующем:

1. Создание цифровой модели рельефа на основе топографической карты и построение картограмм морфометрических характеристик. На основе топографической карты была построена ЦМР с разрешением 5 м, метод интерполяции - универсальный кригинг. На основе ЦМР было построено 35 карт производных морфометрических характеристик рельефа, таких как экспозиция склона, крутизна склонов, водосборная площадь, индекс мощности потока, топографический индекс, горизонтальная кривизна, вертикальная кривизна и другие (Флоринский, 2016).

Для подготовки к полевому обследованию была построена карта элементарных поверхностей мезорельефа (Гедымин, 1990). По крутизне и форме склона было выделено 10 элементов рельефа. По крутизне склона были выделены: ровные поверхности крутизной до 1° , слабые склоны $1-3^{\circ}$, средние по крутизне склоны $3-5^{\circ}$, крутые склоны $5-8^{\circ}$. Встретились также склоны более 8° (рис.1, Б). На основе индекса конвергенции были определены склоны выпуклой и вогнутой формы.

2. Полевое обследование 2014-2015 гг. Было заложено 23 полнопрофильных разреза, 93 поляны и 50 прикопок, что соответствует нормам выработки для 4-ой категории сложности местности для почвенной съемки (Общесоюзная инструкция..., 1973). Точки обследования (рис. 1, А) охватывали всю территорию и закладывались преимущественно по катенам с учетом отображения всех элементов мезорельефа исследуемой территории. Производился отбор почвенных образцов. Была создана пространственная база данных, содержащая 166 точек обследования.

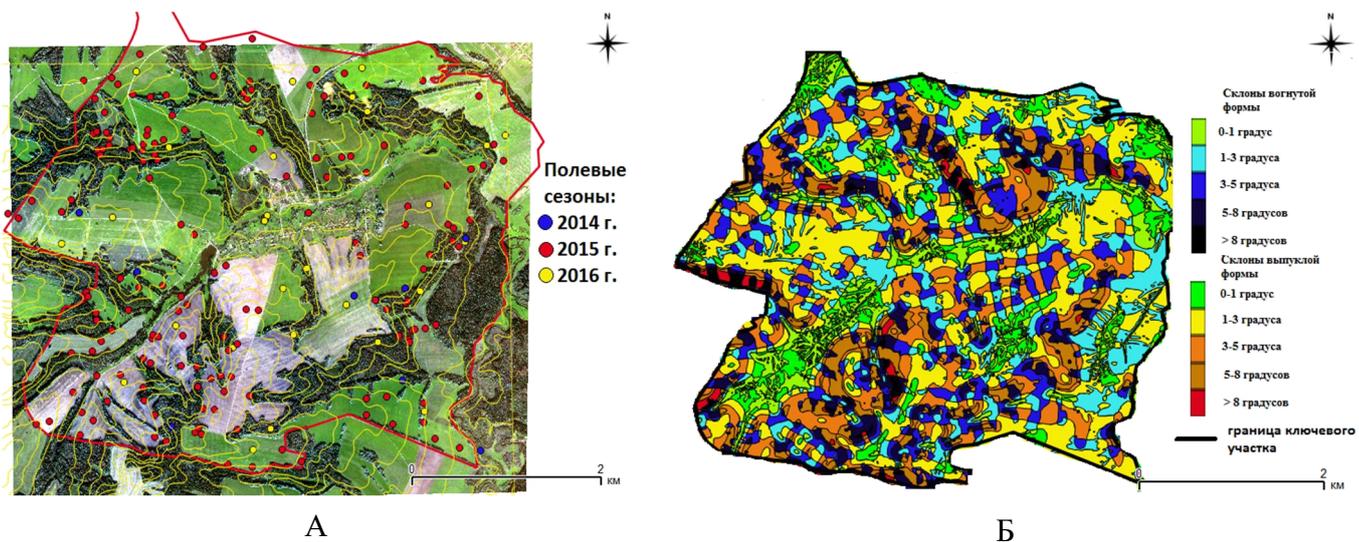


Рис. 1 Территория исследования: А. Распределение точек обследования полевых сезонов 2014-2016 гг. на космическом снимке WorldView-1. Б. Карта элементарных поверхностей мезорельефа

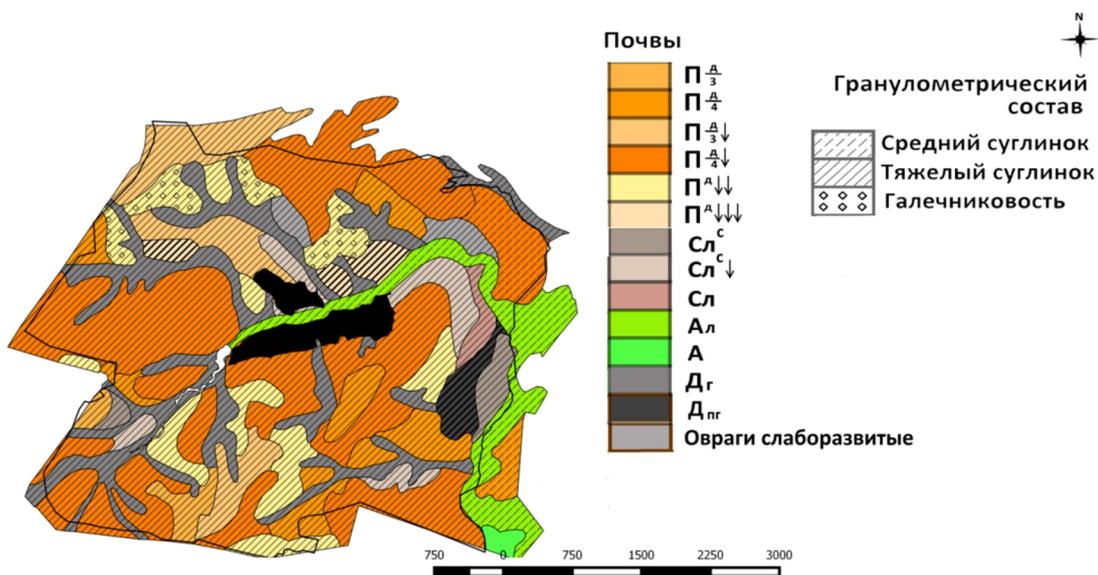


Рис. 2 Почвенная карта 1984 г. (масштаб 1:50 000)

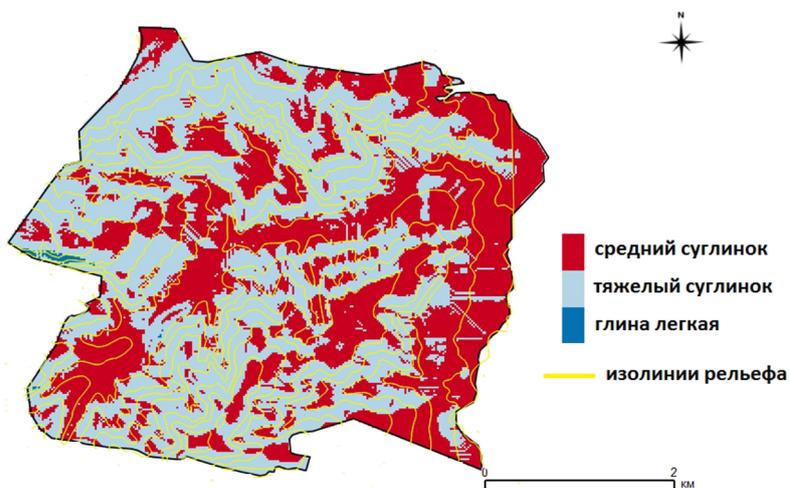


Рис. 3 Картограмма пространственного распределения гранулометрического состава верхнего гумусового горизонта

3. Создание индикационной таблицы и почвенной карты. Путем соотнесения точек полевого обследования 2014-2015 гг. и карты элементарных поверхностей мезорельефа была создана индикационная таблица (Сорокина, 2006). Для построения почвенной карты был создан ГИС-проект, который включал в себя несколько тематических слоев: построенную карту элементарных поверхностей мезорельефа (рис. 1, Б), космический снимок сверхвысокого разрешения (рис.1, А), картограмму пространственного распределения гранулометрического состава верхнего гумусового горизонта (рис. 3) и слой с точками полевого обследования (рис. 1, А). Путем анализа всех слоев и, руководствуясь индикационной таблицей, было проведено определение границ почвенных контуров и построена почвенная карта на исследуемую территорию (рис. 5).

Проверка точности полученной почвенной карты проводилась двумя способами: во-первых, согласно методике Н.П. Сорокиной (2006), основанной на определении вероятности (средневзвешенной по площади) безошибочного определения всех почвенных ареалов, во-вторых, по случайной независимой проверочной выборке, состоящей из 27 разрезов.

4. Выбор условных почвенных групп и отбор переменных-предсказателей. База данных состояла из 166 разрезов и прикопок, а при проведении процедур моделирования необходимо, чтобы на каждую классификационную группу приходилось не менее 10 наблюдений, поэтому для цифрового картографирования были выбрано 8 крупных почвенных групп: дерново-подзолистые несмытые, дерново-подзолистые слабосмытые, дерново-подзолистые среднесмытые, дерново-подзолистые сильносмытые, дерново-подзолистые намытые, светло-серые лесные, дерново-глеевые и аллювиальные почвы. Такой набор условных почвенных групп позволяет отразить все представленные типы почв и распределение смытых почв на территории исследования, последнее важно для грамотного планирования сельскохозяйственной деятельности.

В наших исследованиях мы пользовались Классификацией почв СССР 1977 г. (Классификация..., 1977) из-за двух объективных причин:

1. Для сравнения почвенных карт необходимо иметь одинаковые классификации, на основе которых эти почвенные карты созданы. Так как в нашем распоряжении была почвенная карта 1984 г., в основе которой была Классификация почв СССР 1977 г., то нашу почвенную карту мы также решили создавать, руководствуясь этой же классификацией. Перевод из одной почвенной классификации в другую не всегда однозначен и корректен.

2. Подтип светло-серые лесные почвы отсутствует в Классификации почв России 2004 г. Этот подтип почв согласно российской классификации относится к типу дерново-подзолистых почвам. Поэтому использование Классификации почв России 2004 г. в нашей работе привело бы к сокращению числа почвенных групп, которые мы изначально наметили выделять для описания почвенного покрова исследуемой территории.

В тексте диссертации приведен перевод названий почв из Классификации почв СССР 1977 г. в Классификацию почв России 2004 г. и Реферативную Базу Почв Мира – «WRB».

Для отбора ковариат (переменных-предсказателей) использовался однофакторный дисперсионный анализ: в качестве фактора выступали почвенные группы, а отклика – ковариата (Дмитриев, 2009).

5. Моделирование пространственного распределения почв на основе пяти алгоритмов и проверка устойчивости модели. На основе созданной базы данных по 166 точкам наблюдений было проведено пространственное моделирование почвенного покрова на основе 5 алгоритмов: множественная логистическая регрессия, деревья решений C5, метод случайного леса, регрессионные деревья, метод опорных векторов.

Устойчивость моделей оценивалась по методу наибольшего благоприятствования (кросс – валидации). Для каждого алгоритма было проведено по 100 итераций, в результате каждой из которых было построено 100 карт. Для построения каждой из этих карт случайным образом из обучающей выборки отбиралось 146 точек (88 %) точек для ее создания, а на оставшихся 20 точках (12 %) проводилась ее проверка (рис. 4). Для каждой полученной карты по результатам проверки по 20 точкам вычислялась общая точность и каппа, а также точность предсказания отдельных почвенных групп, называемая «точность производителя».



Рис. 4 Соотношение обучающей и проверочной выборок в исследовании

Устойчивость картографической модели (алгоритма), оцененная в результате 100 итераций, показывает насколько хорошо картографическая модель будет самовоспроизводиться на разных выборках и характеризуется распределением общей точности, коэффициента каппа и точности предсказания отдельных почвенных групп.

В данной работе для каждого алгоритма были рассчитаны средние значения, минимальные и максимальные значения вышеперечисленных характеристик, а также были визуализированы две почвенные карты на основе моделей, имеющих среднее значение каппы и максимальное значение этого показателя.

Для каждого из 5 алгоритмов были выбраны карты, имеющие средние значения каппы, и на этих картах были выбраны пиксели, которые были отнесены к одинаковым почвенным группам всеми алгоритмами. Аналогичная процедура была проведена и с картами, построенными на основе множественной логистической регрессии, метода случайного леса и опорных векторов.

6. Сравнение полученных почвенных карт проводилось по 200 случайным точкам. Выборка была проверена на то, что предполагаемые точки, соотносятся в выборке согласно пропорциям площадей, занимаемых почвами на построенной нами традиционной почвенной карте. Сравнивались следующие карты: почвенные карты 2016 г. и 1984 г. и 10 цифровых почвенных карт, полученных на основе моделей со средними и максимальными величинами каппы. Для каждой пары сравниваемых карт рассчитывались общая точность и каппа.

Во время полевого сезона 2016 г. было заложено 27 разрезов и полюям (рис. 1, А). Местоположения были выбраны случайно, но выборка была стратифицирована согласно пропорциям площадей, занимаемых почвенными группами. Эти точки были использованы для внешней проверки картографических моделей (рис. 4).

Было проведено сравнение карт, построенных на основе одного и того же метода цифрового картографирования, но с разными коэффициентами каппа устойчивости моделей: средней каппой и максимальной каппой.

7. Построение картограмм содержания углерода. В ходе полевого обследования были отобраны образцы из верхнего гумусового горизонта (0-20 см). Содержание органического углерода определялось в лаборатории Биологии и биохимии почв ФГБНУ «Почвенного института имени В.В. Докучаева» методом каталитического сжигания при высокой температуре.

Для построения картограмм содержания углерода гумуса в верхнем гумусовом горизонте была отобрана 101 точка обследования, расположенные на полях хозяйства. Картограммы были построены методами ординарного и регрессионного кригинга. Интерполяция методом регрессионного кригинга отличается от ординарного кригинга тем, что она проводится в два этапа. На первом этапе оценивается тренд содержания органического углерода на основе множественной линейной регрессии от переменных-предсказателей. На втором этапе проводится кригинг остатков. Результатом регрессионного кригинга является сумма кригинга остатков и интерполяции на основе тренда. На основе картограммы, построенной методом регрессионного кригинга, была создана карта запасов гумуса полей. Для расчетов запасов гумуса была взята средняя величина плотности верхних малогумусовых горизонтов дерново-подзолистых почв (1,2 г/см³) (Качинский, 1970). Были вычислены средние запасы гумуса для каждой условной почвенной группы по почвенной карте, созданной традиционным методом обследования с элементами ГИС-анализа.

В ходе работы использовалось следующее программное обеспечение: QuantumGIS 2.8.2, SAGA GIS 2.1.2, Multispec и программная среда R 3.3.1, включая пакеты gstat, raster, rgdal, rpart, Random Forest, C50, e1071, ithir, nnet, stats, sp.

Результаты исследований

Глава 3. Построение почвенной карты на район исследования

Почвенная карта, приведенная на рисунке 5 включает 41 разновидность почв, которые относятся к четырем различным типам почв. В результате анализа построенной почвенной карты было выявлено, что менее 5 % территории занято дерново-подзолистыми несмытыми почвами. Аллювиальные почвы согласно построенной карте занимают 5,0 % от общей площади, дерново-подзолистые почвы различной степени смытости и намывтости – 80,3 %, светло-серые лесные – 5,4 %, дерново-глеевые – 6,6 % (рис. 6, табл. 1).

Таблица 1. Площади основных почвенных выделов на исследуемой территории согласно картам 1984 г. и 2016 г.

Почвенные выделы	1984		2016	
	Общая площадь (км ²)	% от площади	Общая площадь (км ²)	% от площади
Аллювиальные почвы	0,71	3,7	0,96	5,0
Дерново-подзолистые несмытые почвы	1,67	8,7	0,95	4,9
Дерново-подзолистые слабосмытые почвы	8,8	45,7	9,3	48,4
Дерново-подзолистые среднесмытые почвы	2,1	10,9	1,7	8,6
Дерново-подзолистые сильносмытые почвы	0,38	2,0	0,6	3,0
Дерново-подзолистые намывные почвы	-	-	2,95	15,4
Светло-серые лесные почвы	1,3	7,0	1,0	5,4
Дерново-глеевые почвы	3,7	19,3	1,2	6,6
Почвы приусадебный участков	0,5	2,5	0,5	2,5
Водная поверхность	0,04	0,2	0,04	0,2
Итого	19,2		19,2	

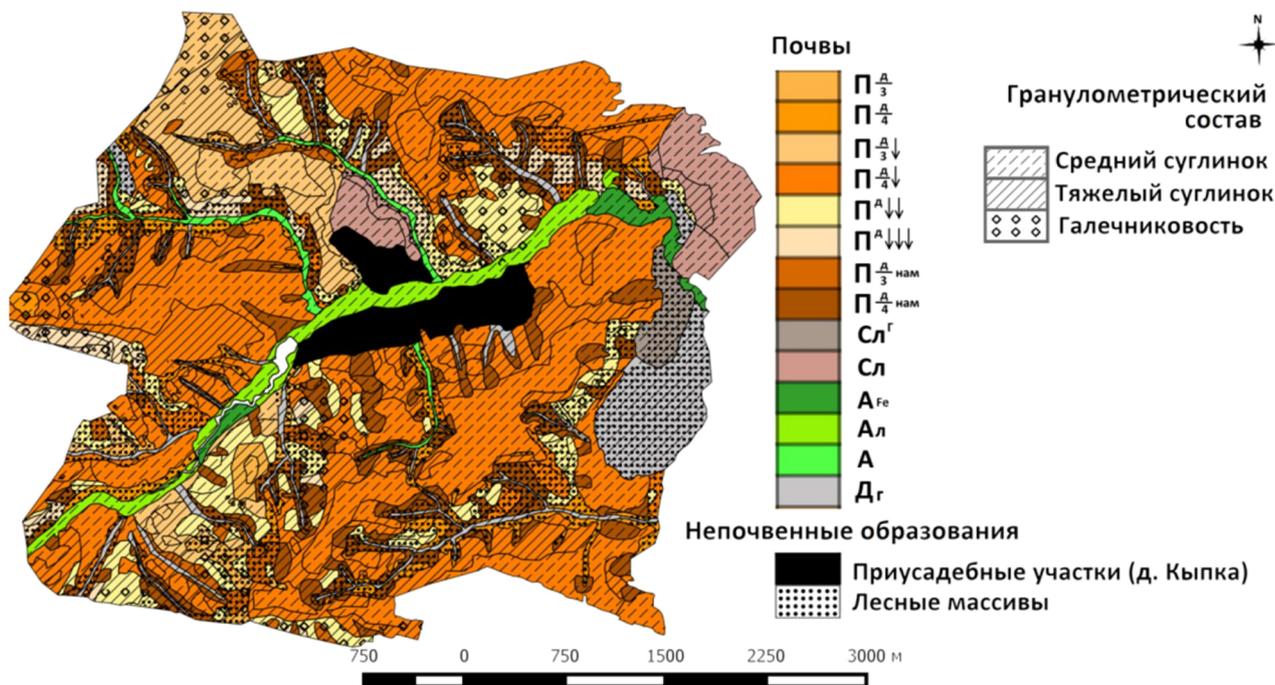


Рис. 5 Почвенная карта, составленная традиционными методами с элементами ГИС-анализа

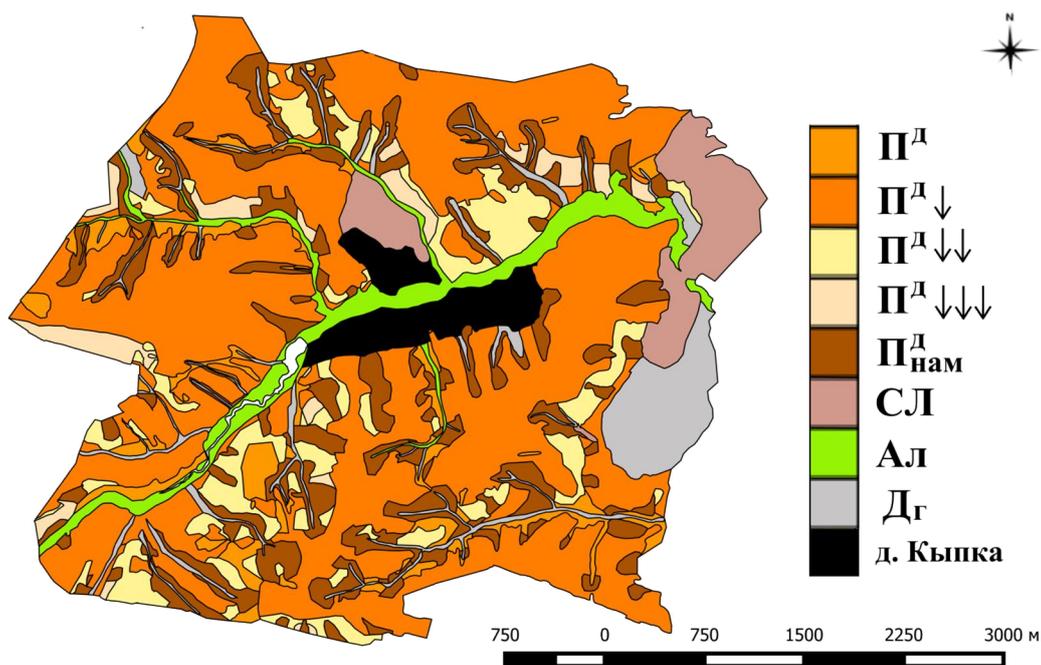


Рис. 6 Почвенная карта 8 условных почвенных групп

На рисунке 6 представлена почвенная карта, на которой отражено пространственное распределение 8 выбранных условных почвенных групп: дерново-подзолистые несмытые, дерново-подзолистые слабосмытые, дерново-подзолистые среднесмытые, дерново-подзолистые сильносмытые, дерново-подзолистые намытые, аллювиальные, дерново-глеевые и светло-серые лесные почвы.

Сравнение с картой 1984 г. показало, что в целом доли площадей основных почвенных типов на данной территории не претерпели существенных изменений за последние 30 лет, кроме дерново-глеевых и дерново-подзолистых намытых почв (табл. 1). Произошло небольшое изменение площадей различных почвенных групп в связи с использованием современных ГИС-

технологий при картографировании: увеличение доли слабосмытых и сильносмытых дерново-подзолистых почв, уменьшение доли дерново-глеевых почв и серых лесных почв на карте 2016 г. по сравнению с картой 1984 г. (табл. 1). Важным отличием от почвенной карты 1984 г. является то, что на данной территории были вскрыты контура намывных почв. Кроме того, около 2,5 % территории приходится на антропогенно-преобразованные почвы приусадебных участков, расположенные непосредственно в районе д. Кыпка.

Была составлена таблица (табл. 2), описывающая распределение оценок условных вероятностей среди почвенных разновидностей территории исследования (Сорокина, 2006). Средняя оценка условных вероятностей для созданной нами почвенной карты составила **0,74**, что согласно критериям, предложенным Н.П. Сорокиной, соответствует категории точности – «вероятная».

Таблица 2. Распределение почвенных разновидностей и условных вероятностей их определения для территории ключевого участка

Способ диагностики ЭПС	Средние оценки *	Наименования **	Кол-во
полное почвенное опробование (>5 точек)	0,96-1,00	Светло-серые лесные средне- и тяжелосуглинистые и глееватые	2
неполное почвенное опробование (2 точки +индикация)	0,85-0,95	Дерново-неглубоко- и глубокоподзолистые освоенные несмытые и слабосмытые, светло-серые лесные среднесуглинистые, дерново-подзолистые сильносмытые освоенные	6
слабое почвенное опробование (небольшое количество точек + индикация)	0,71-0,84	Все аллювиальные почвы, дерново-подзолистые среднесмытые освоенные, дерново-неглубоко- и глубокоподзолистые освоенные слабосмытые, светло-серые лесные намывные, дерново-подзолистые сильносмытые освоенные тяжелосуглинистые, дерново-подзолистые среднесмытые среднесуглинистые	13
только индикация (разрезы отсутствуют)	0,67-0,70	Все дерново-подзолистые намывные, все дерново-глеевые почвы, дерново-подзолистые среднесмытые тяжелосуглинистые, дерново-неглубоко- и глубокоподзолистые слабосмытые, дерново-неглубоко- и глубокоподзолистые несмытые, дерново-подзолистые сильносмытые освоенные глинистые, дерново-подзолистые сильносмытые тяжелосуглинистые, светло-серые лесные	20

*- условные вероятности

** там, где не указан гранулометрический состав, то он средне- и тяжелосуглинистый

Проверка по 27 точкам случайной независимой выборки показала, что точность созданной нами почвенной карты составила 82 %, т.е. в ходе полевого сезона 2016 г. условные почвенные группы, определенные в 22 точках из 27, совпали с почвенными группами в этих точках, отраженными на полученной нами карте. Коэффициент каппа показал существенное совпадение «реальных» почв в точках с почвами, отраженными на почвенной карте и составил 0,76.

Таким образом, согласно проведенной оценке построенная почвенная карта хорошо отражает закономерности пространственного распределения условных почвенных групп на территории исследования и удовлетворительно коррелирует с картой 1984 г.

Глава 4. Создание почвенных карт средствами ЦПК

Из 35 ковариат было отобрано 25, таких как характер землепользования, крутизна склона, минимальная, максимальная, вертикальная, горизонтальная, поперечная и другие кривизны, фактор длины склона и другие. NDVI по снимку WorldView-1 не имел значимых корреляций с условными почвенными группами, выбранными нами.

Множественная логистическая регрессия

Общая точность 100 полученных моделей для описания пространственного распределения почв на основе множественной логистической регрессии составляет от 30 до 85 % при средней общей точности 61,1 %, а каппа этих моделей варьирует в диапазоне от 0,06 до 0,77 при среднем каппа равном 0,44 (рис. 7).

Множественная логистическая регрессия более чем с 78 %-ой вероятностью правильно предсказывает дерново-подзолистые слабосмытые почвы, а аллювиальные - с вероятностью 95,4 %. Другими словами, лишь небольшое количество пикселей, которые согласно выборке для внутренней проверки относились к этим условным почвенным группам, были ошибочно классифицированы как другие почвенные группы. Модель плохо предсказывает дерново-подзолистые сильносмытые и намытые почвы, а также светло-серые лесные (табл. 3).

Таким образом, использование модели множественной логистической регрессии при пространственном предсказании распределения почвенных групп позволяет достоверно провести почвенное картографирование исследуемого участка территории. Эта модель имеет ряд преимуществ: наилучшая средняя точность предсказания ареалов распространения дерново-подзолистых несмытых, сильносмытых и намытых почв, слабая зависимость качества картографического материала от каппы устойчивости модели при проведении классификации.

Деревья решений C5

Общая точность 100 полученных моделей деревьев решений C5 для описания пространственного распределения почв составляет от 35 до 75 % при средней общей точности 55,7 %, а каппа устойчивости моделей варьирует в диапазоне от 0 до 0,64 при среднем каппа равном 0,32 (рис. 8).

Деревья решений C5 с высокой точностью предсказывают дерново-подзолистые слабосмытые и аллювиальные почвы: средняя точность предсказания 86,2 и 97,3 %, соответственно (табл. 3). Низкая точность предсказания для дерново-подзолистых сильносмытых и намытых почв, а также светло-серых лесных и дерново-глеевых почв, показывает, что большое количество пикселей, которые согласно выборке для внутренней проверки относятся к этим условным почвенным группам, ошибочно классифицируются как другие почвенные группы.

Кроме того, визуальное сравнение карт, построенных на основе моделей деревьев решений с максимальной и средней каппой, показало их существенное различие (на карте с максимальной каппой присутствуют контура дерново-глеевых почв, которых нет на карте со средней каппой) и слабую устойчивость алгоритма, т.к. отнесение к тому или иному почвенному выделу одной и той же точки растра для двух этих моделей может быть различным. Однако преимуществом этой модели является наибольшая средняя точность предсказания ареалов распространения дерново-подзолистых слабосмытых почв.

Таблица 3. Средняя точность предсказания условных почвенных групп при моделировании на основе 5 алгоритмов

Почвы	*MNLР	C5	RF	RT	SVM
	Средняя точность предсказания условных почвенных групп, %				
**П ^д	71,7	26,0	43,7	68,3	46,2
П ^д ↓	78,4	86,2	77,6	68,8	75,9
П ^д ↓↓	60,9	55,3	67,1	54,7	57,6
П ^д ↓↓↓	19,1	0	0	0	9,1
П ^д _{нам}	45,4	5,2	23,5	18,6	42,1
Ал	95,4	97,3	91,2	11,8	100
Дг	43,7	8,2	53,4	0	63,3
СЛ	0	0	0	0	0

*MNLР – множественная логистическая регрессия, C5 - деревья решений C5, RF – метод случайного леса, RT – регрессионные деревья, SVM – метод опорных векторов.

**Ал – аллювиальная, Дг - дерново-глеевая, П^д – дерново-подзолистая несмытая, П^д↓ – дерново-подзолистая слабосмытая, П^д↓↓ – дерново-подзолистая среднесмытая, П^д↓↓↓ – дерново-подзолистая сильносмытая, П^д_{нам} – дерново-подзолистая намытая, СЛ – светло-серая лесная.

Метод случайного леса

Общая точность 100 полученных моделей случайного леса для описания пространственного распределения почв составляет от 35 до 85 % при средней общей точности 59,3 %, а каппа устойчивости моделей варьирует в диапазоне от 0 до 0,75 при среднем каппа равном 0,40 (рис. 9).

Метод случайного леса с наибольшей точностью предсказывает дерново-подзолистые слабо- и среднесмытые и аллювиальные почвы (средняя точность предсказания от 67 до 91 %). Плохо предсказываются дерново-подзолистые сильносмытые и светло-серые лесные почвы (табл. 3).

Преимуществами этой модели являются: правильное выделение ареалов распространения светло-серых лесных почв, высокая точность при предсказании дерново-подзолистых почв разной степени смытости и наибольшая точность среди всех моделей при предсказании дерново-подзолистых среднесмытых почв, слабая зависимость качества получаемого картографического материала от каппы устойчивости модели при проведении классификации.

Регрессионные деревья

Общая точность 100 полученных моделей регрессионных деревьев для описания пространственного распределения почв составляет от 30 до 70 % при средней общей точности 48,5 %, а каппа устойчивости моделей варьирует от 0 до 0,52 при среднем каппа равном 0,26 (рис. 10).

Регрессионные деревья с наибольшей точностью предсказывают дерново-подзолистые несмытые и слабосмытые почвы (средняя точность предсказания 68,3 и 68,8 %, соответственно).

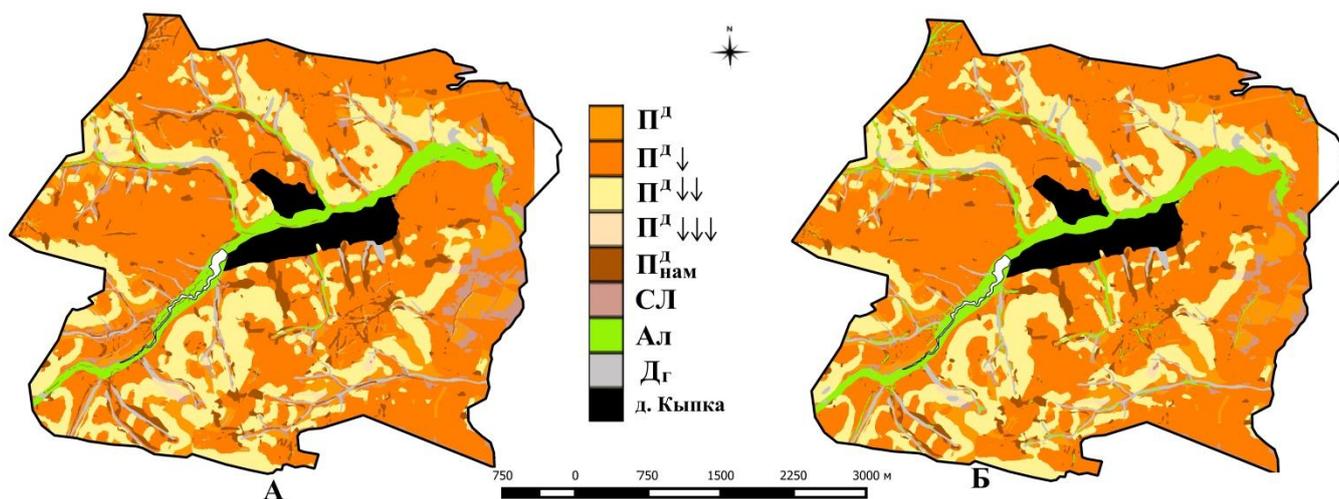


Рис. 7 Почвенные карты, построенные на основе множественной логистической регрессии: А- модель с капшой устойчивости = 0,44 и Б- модель с капшой устойчивости = 0,77

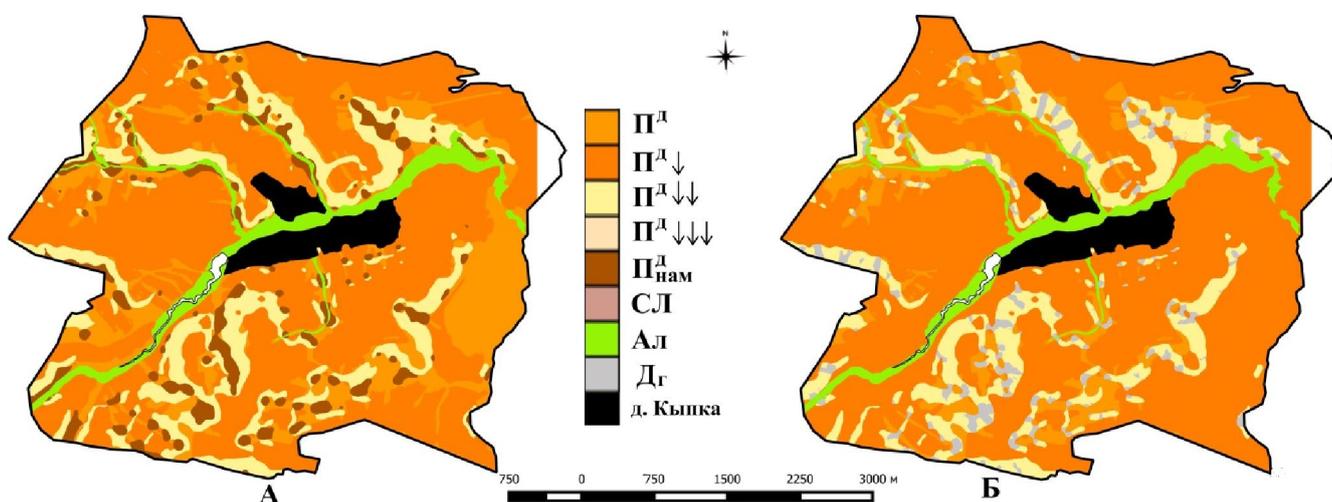


Рис. 8 Почвенные карты, построенные на основе моделей деревьев решений C5: А- модель с капшой устойчивости = 0,32 и Б - модель с капшой устойчивости = 0,64.

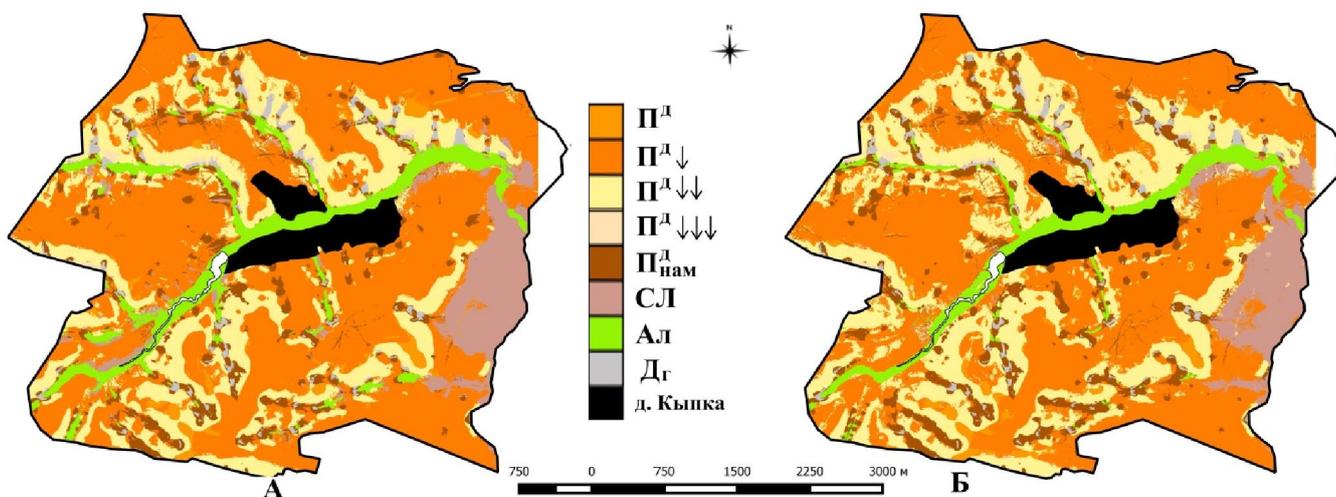


Рис. 9 Почвенные карты, построенные на основе моделей случайного леса: А- модель с капшой устойчивости = 0,40 и Б- модель с капшой устойчивости = 0,75

Точность предсказания для дерново-подзолистых среднесмытых почв (54,7 %) показывает, что только половина всех дерново-подзолистых среднесмытых почв проверочной выборки предсказывается верно, плохо предсказываются также все остальные почвенные группы (табл.3).

Таким образом, использование регрессионных деревьев при пространственном предсказании распределения почвенных групп плохо помогает выявить закономерности распределения этих почвенных групп на территории исследования в связи со слабой устойчивостью алгоритма, а, соответственно, и сильными различиями в результатах картографирования.

Метод опорных векторов

Общая точность 100 полученных моделей для описания пространственного распределения почв на основе метода опорных векторов составляет от 30 до 85 % при средней общей точности 59,5 %, а каппа устойчивости моделей варьирует от 0 до 0,79 при среднем каппа равном 0,41 (рис. 11).

Метод опорных векторов лучше всего предсказывает аллювиальные, дерново-глеевые и дерново-подзолистые слабосмытые почвы (точность предсказания 100 %, 63,3 % и 75,9 %, соответственно). Точность предсказания для дерново-подзолистых среднесмытых и несмытых почв находится в районе 50 % (57,6 и 46,2 % соответственно) (табл. 3).

Преимуществами этой модели являются: высокая средняя точность предсказания ареалов распространения дерново-подзолистых, дерново-глеевых и аллювиальных почв, слабая зависимость качества получаемого картографического материала от каппы устойчивости модели при проведении классификации, одна из лучших среди всех моделей средняя точность предсказания для дерново-подзолистых намытых почв и хорошее совпадение пространственного рисунка распределения этой почвенной группы с картой 2016 г. на основе визуального сравнения (табл. 3).

Таким образом, моделирование пространственного распределения почвенных выделов пятью методами автоматизированной классификации с обучением показало, что наилучшим образом выделяются дерново-подзолистые слабосмытые и среднесмытые почвы. На втором месте по значениям средней точности предсказания находятся дерново-подзолистые несмытые и намытые, а также дерново-глеевые и аллювиальные почвы. Хуже всего методами автоматической классификации выделяются дерново-подзолистые сильносмытые и светло-серые лесные почвы.

В результате исследования наибольшая средняя каппа устойчивости модели 0,44 наблюдается в случае множественной логистической регрессии, в то время как наименьшая средняя каппа равняется 0,26 для модели регрессионных деревьев.

С экспертной точки зрения цифровые почвенные карты, построенные на основе моделей деревьев решений с максимальной каппой устойчивости модели и регрессионных деревьев со средней каппой устойчивости, ближе соответствуют карте 2016 г., по сравнению с другими цифровыми картами. Большое сходство также наблюдается с картами, смоделированными на основе множественной логистической регрессии и метода опорных векторов. На основе визуального сравнения наименьшая степень схожести почвенной карты, построенной нами, наблюдается с картой, созданной на основе регрессионных деревьев с максимальной каппой устойчивости модели.

Наиболее схожими между собой оказались карты, построенные на основе метода множественной логистической регрессии. Коэффициент каппа, равный 0,91, показал почти полное совпадение двух карт. Хорошее совпадение между собой показали карты, построенные на основе других алгоритмов, коэффициент каппа сравнения варьировал в диапазоне от 0,63 до 0,74.

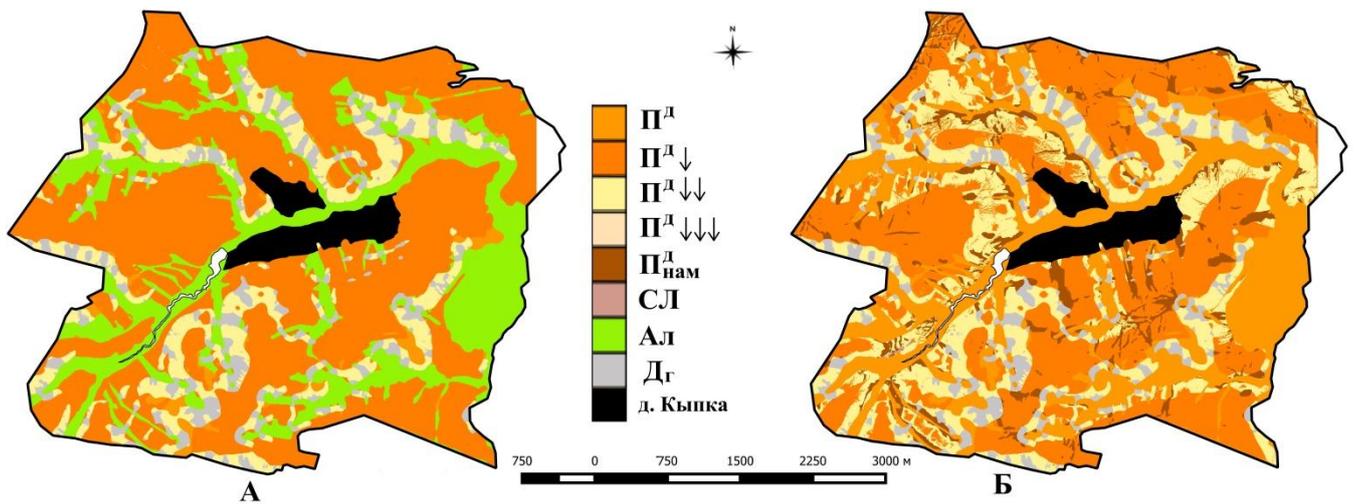


Рис. 10 Почвенные карты, построенные на основе регрессионных деревьев: А- модель с капшой устойчивости = 0,26 и Б- модель с капшой устойчивости = 0,52

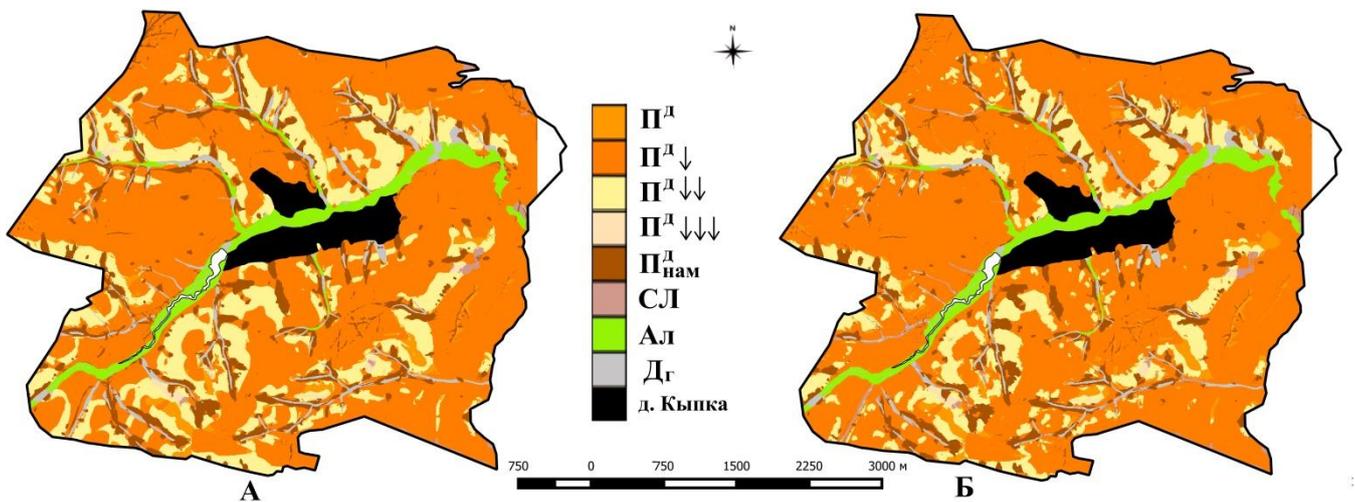


Рис. 11 Почвенные карты, построенные на основе метода опорных векторов: А- модель с капшой устойчивости = 0,40 и Б- модель с капшой устойчивости = 0,79

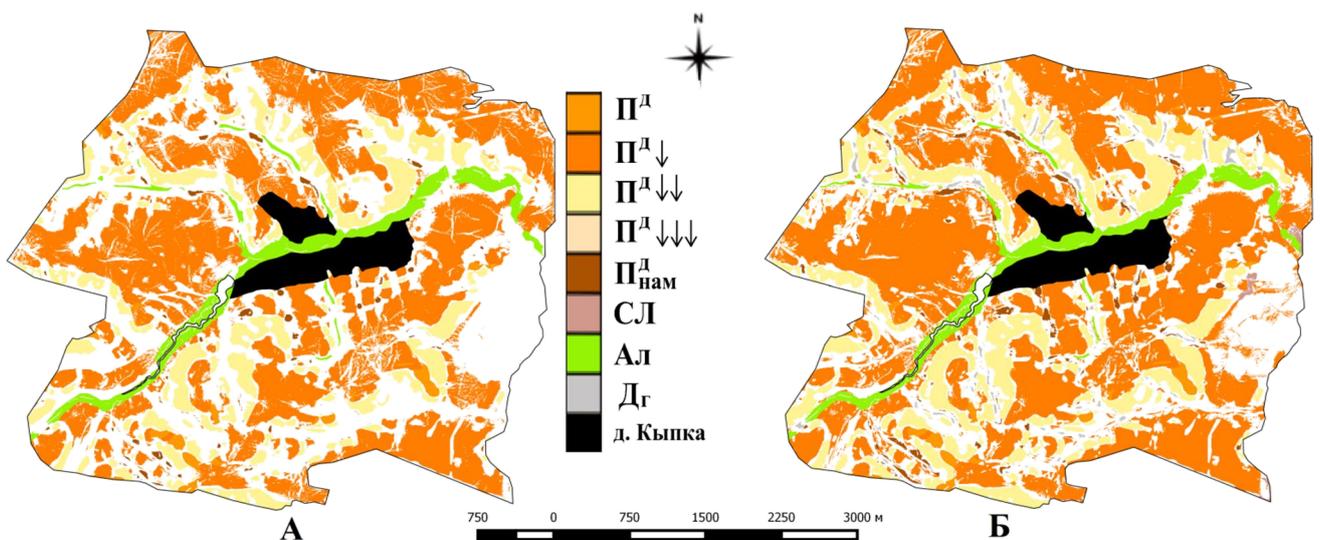


Рис. 12 Карта распределения участков единообразной классификации при картографировании исследуемой территории. А- пятью методами. Б- тремя методами

Следовательно, модели множественной логистической регрессии, характеризующиеся различными коэффициентами каппа, будут разделять исследуемую территорию схожим образом, то есть уровень единообразия получаемых картографических материалов на основе этой модели будет высок.

Для исследуемой территории были построены карты распределения участков единообразной классификации, пространственное распределение почвенного покрова на которых одинаково при моделировании на основе используемых алгоритмов (рис. 12).

На построенных картах разными цветами отмечены пиксели, которые при моделировании на основе каждого алгоритма были отнесены к одному и тому же классу объектов. Белым цветом выделены территории, которые различными методами классификации были отнесены к разным классам. Отмечено, что 55 % или 10,53 км² площади исследуемой территории классифицируются всеми методами единообразно (рис. 12, А). В процессе моделирования пространственного распределения почвенного покрова алгоритмы регрессионных деревьев и деревьев решений С5 не выделяли на исследуемой территории почвенные группы: светло-серые лесные, дерново-глеевые и дерново-подзолистые намытые почвы. Три других алгоритма (множественная логистическая регрессия, метод случайного леса и метод опорных векторов) разделяли эту территорию на все восемь отобранных изначально условных почвенных групп. Поэтому были выделены пиксели и построена карта распределения участков единообразной классификации тремя этими методами. 66 % или 12,71 км² площади исследуемой территории классифицируются множественной логистической регрессией, методом случайного леса и методом опорных векторов одинаково (рис. 12, Б).

Большой процент «устойчивых» пикселей принадлежит дерново-подзолистым слабосмытым почвам, что, по-видимому, связано с наибольшим распространением этих почв на территории исследования.

Наибольшая определенность при классификации наблюдалась на выровненных участках рельефа и территориях с углами наклона до 3⁰. Наибольшая неопределенность при классификации используемыми моделями отмечалась для территорий, которые располагались под лесной растительностью, а также территорий с депрессивными элементами рельефа (балки, овраги, ложбины).

Глава 5. Сравнение цифровых карт с почвенной картой 2016 г. и проверка по случайной независимой выборке

Наибольшее совпадение почвенной карты 2016 г. отмечается с почвенной картой, смоделированной на основе модели деревьев решений С5 с каппой устойчивости равной 0,64: коэффициент каппа показал существенное совпадение двух карт и составил 0,61, а общая точность или степень совпадения карт составила 73 % (табл. 4). Стоит отметить, что худшие результаты сравнения среди цифровых карт получились с картой, построенной на основе модели регрессионных деревьев с максимальной каппой 0,52: коэффициента каппа (0,38) и общая точность (56 %) сравнения показали удовлетворительное совпадение таких карт. Сравнение с картой 1984 г., построенной специалистами Уралгипрозема, показало удовлетворительное совпадение с построенной нами картой: каппа составила 0,26, а общая точность 47 %.

В результате сравнения по 200-ам случайным точкам почвенных карт, полученных на основе различных моделей, с почвенной картой 2016 года были выявлено, что точность почвенных карт, созданных на основе цифровых моделей, коэффициент каппа устойчивости которых характеризуется средними величинами для этих моделей, выше чем, точность карт, построенных на основе этих же видов моделей с максимальным значением коэффициента каппа (кроме моделей: деревья решений С5 и множественная логистическая регрессия) (табл. 4).

Таблица 4. Сравнение почвенных карт с картой 2016 г., построенной традиционным методом почвенного обследования с элементами ГИС-анализа

Почвенные карты, с которыми производилось сравнение	Каппа, характеризующая устойчивость цифровой модели	Каппа таблицы сопряженности	Общая точность или степень совпадения, %
Карта 1984 г.	-	0,26	47
Множественная логистическая регрессия	средняя $k= 0,44$	0,50	66
	максимальная $k= 0,77$	0,51	67
Деревья решений C5	средняя $k= 0,32$	0,48	65
	максимальная $k= 0,64$	0,61	73
Метод случайного леса	средняя $k= 0,40$	0,46	65
	максимальная $k= 0,75$	0,44	62
Регрессионные деревья	средняя $k= 0,26$	0,57	70
	максимальная $k= 0,52$	0,38	56
Метод опорных векторов	средняя $k= 0,40$	0,47	65
	максимальная $k= 0,79$	0,45	65

Это происходит из-за слишком большой настройки на данные в случае, когда каппа модели максимальна, т.е. получаемая модель оказывается слишком привязанной к конкретным данным. Степень совпадения карты 2016 г. с картами, построенными методами ЦПК, оказалась выше, чем с картой 1984 г., что связано с тем, что цифровые карты и карта 2016 г. строились на основании одной и той же входной информации (созданной базы данных) в отличие от карты 1984 г.

Проверка полученных карт по случайной независимой выборке дает возможность судить о качестве модели и уровне точности, с которым мы можем экстраполировать результаты моделирования на всю территорию. Лучшие результаты проверки по случайной независимой выборке показала карта, построенная традиционным методом почвенного обследования с элементами ГИС-анализа, каппа (0,76) и общая точность (82 %) показали существенное совпадение реальных почвенных групп, диагностированных в поле, с почвенными группами согласно карте 2016 г. (табл. 5).

Таблица 5. Проверка построенных карт по случайной независимой выборке из 27 точек

Почвенные карты, с которыми производилось сравнение	Каппа, характеризующая устойчивость цифровой модели	Каппа таблицы сопряженности	Общая точность, %
Карта 2016 г.	-	0,76	82
Карта 1984 г.	-	0,35	49
Множественная логистическая регрессия	средняя $k= 0,44$	0,40	52
	максимальная $k= 0,77$	0,47	60
Деревья решений C5	средняя $k= 0,32$	0,46	60
	максимальная $k= 0,64$	0,47	60
Метод случайного леса	средняя $k= 0,40$	0,46	60
	максимальная $k= 0,75$	0,41	56
Регрессионные деревья	средняя $k= 0,26$	0,29	45
	максимальная $k= 0,52$	0,39	52
Метод опорных векторов	средняя $k= 0,40$	0,51	63
	максимальная $k= 0,79$	0,38	52

Из полученных нами результатов сравнения следует, что наиболее качественной и точной моделью для экстраполяции результатов на всю территорию ключевого участка является модель со средней капшой устойчивости для алгоритма метода опорных векторов. Результаты сравнения показали хорошее совпадение «реальных» почвенных групп, диагностированных в поле, и почв согласно этой почвенной карте. Каппа при сравнении этой карты со случайной независимой выборкой составила 0,51, а общая точность составила 63 % (табл. 5).

Худшие результаты сравнения, а соответственно и худшей моделью для экстраполяции, является модель на основе регрессионных деревьев, каппа устойчивости которой составляет 0,26. Удовлетворительное совпадение согласно грациям каппы было получено при проверке этой модели по случайной независимой выборке. Каппа составила 0,29, а степень совпадения составила 52 %.

Таким образом, по количественным характеристикам цифровые почвенные карты, построенные на основе моделей деревьев решений C5 с максимальной каппой устойчивости модели и метода опорных векторов со средней каппой устойчивости, ближе соответствуют карте 2016 г. и «реальному» пространственному распределению условных почвенных групп.

Глава 7. Построение картограммы содержания органического углерода в верхнем гумусовом слое полей, подсчет запасов гумуса и оценка точности предсказания

Среднее содержание органического углерода в верхних 20 см гумусовых горизонтов составило 0,94 %, стандартное отклонение – 0,47%, минимальное значение содержания органического углерода составило – 0,25%, а максимальное – 3,18%. Содержание органического углерода значимо коррелирует со следующими морфометрическими характеристиками: крутизна склона, топографический индекс влажности, индекс всхолмленности рельефа, водосборные склоны, русловая сеть, абсолютные высоты рельефа и водосборная площадь. Однако коэффициенты корреляции не превышают 0,43.

Было показано, что полученные семивариограммы дисперсии содержания органического углерода на полях для ординарного кригинга (рис. 13, А) и остатков при регрессионном кригинге (рис. 13, Б) от величины смещения являются транзитивными и имеют сферическую форму. Выявлено, что наггет-эффект, порог и ранг для семивариограммы остатков при регрессионном кригинге меньше, чем для семивариограммы для ординарного кригинга (рис. 13, табл. 6).

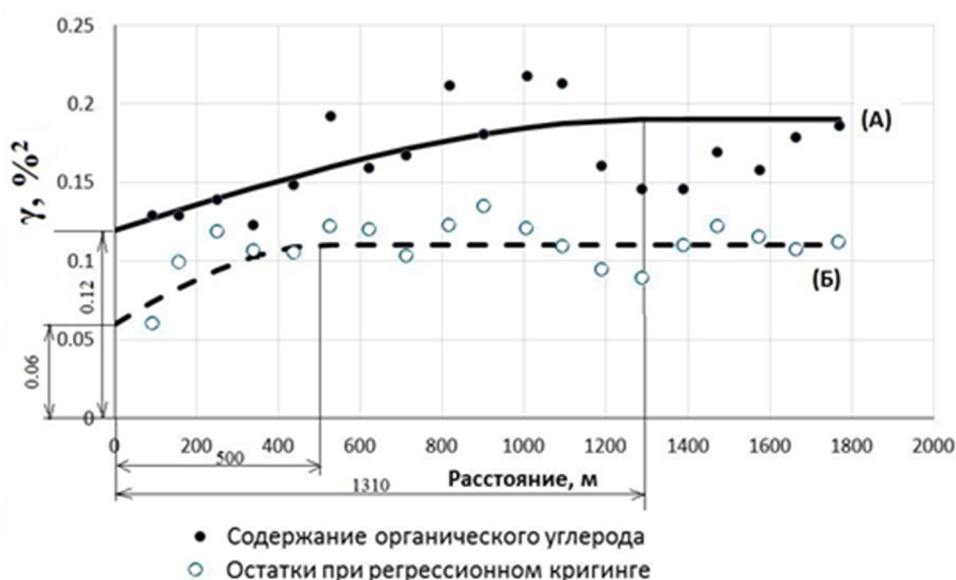


Рис. 13 Семивариограммы: (А) содержания органического углерода гумуса полей и (Б) остатков при регрессионном кригинге

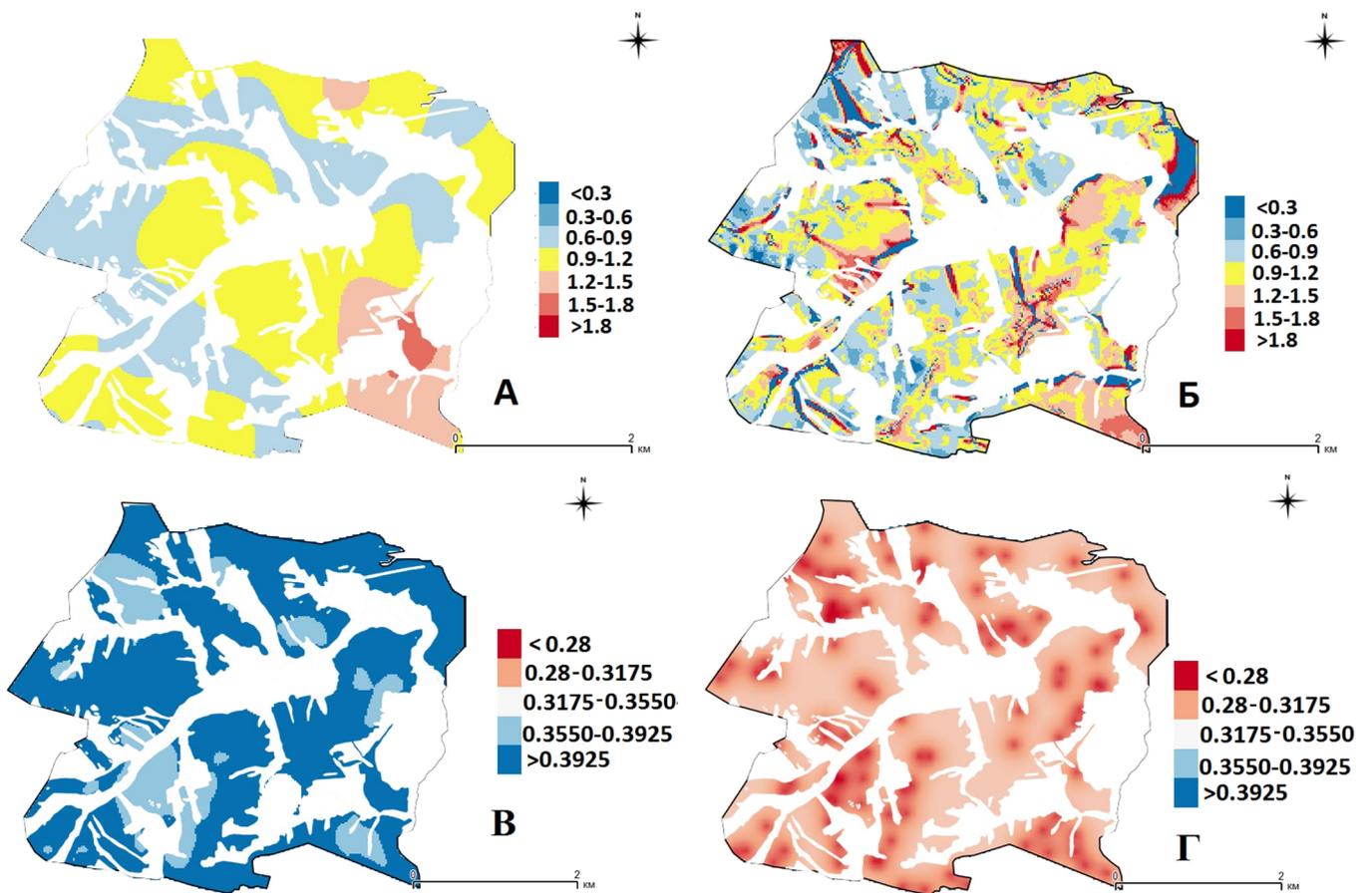


Рис. 14 Картограммы содержания органического углерода гумуса в верхних 20 см сельскохозяйственных полей, построенные методами: (А) ординарного кригинга и (Б) методом регрессионного кригинга, а также картограммы ошибок предсказания: (В) ординарным кригингом и (Г) регрессионным кригингом

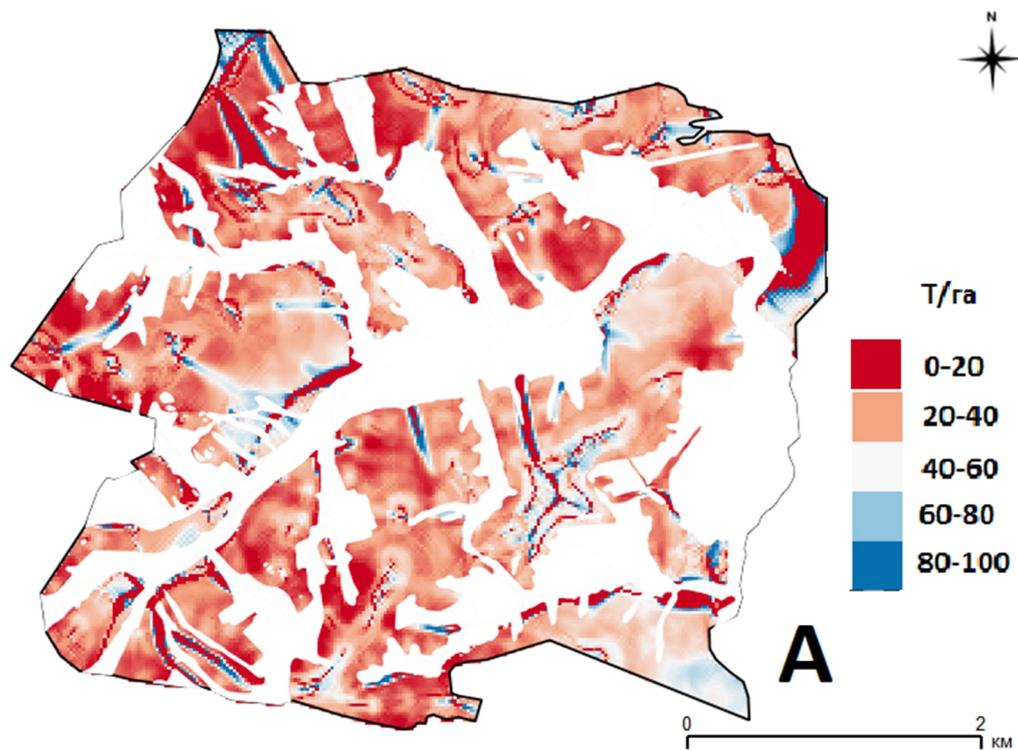


Рис. 15 Картограмма запасов гумуса в верхних 20 см сельскохозяйственных полей исследуемого участка

Таблица 6. Характеристики семивариограмм, используемых при ординарном и регрессионном кригинге

Методы интерполяции	Модель ординарного кригинга	Модель для остатков при регрессионном кригинге
Тип семивариограммы	Сферическая	Сферическая
Наггет-эффект, %	0,12	0,06
Частичный порог, %	0,071	0,05
Ранг, м	1309,75	500

Согласно картограмме, построенной методом регрессионного кригинга, наименьшие значение содержания органического углерода гумуса характерно для территорий, занятых умеренными и крутыми склонами, например, в северо-западной части ключевого участка (рис. 14, Б). В то же время, картограмма, полученная на основе ординарного кригинга, в общем виде отражает закономерности распределения органического углерода на полях исследуемой территории.

Согласно этой картограмме наименьшее содержание органического углерода гумуса также как и в случае картограммы, построенной методом регрессионного кригинга, характерно для северо-западной части участка, в центральной части территории содержание органического углерода гумуса составляет от 0,9% до 1,2% (рис. 14, А). Предсказание на основе регрессионного и ординарного кригинга показало, что поля юго-восточной части ключевого участка характеризуются самым большим содержанием органического углерода гумуса в верхних 20 см полей (рис. 14, А, Б).

Визуальное сравнение и интерпретация картограмм содержания органического углерода гумуса, построенных методами регрессионного и ординарного кригинга, показало, что на картограмме, построенной регрессионным кригингом, выделяется большее количество элементарных контуров. Этот фактор в совокупности с меньшей ошибкой предсказания (рис. 14, В, Г) дает основание сделать вывод о том, что регрессионный кригинг является более предпочтительным и точным методом интерполяции, чем ординарный кригинг. Поэтому построение картограммы запасов гумуса в верхних 20 см полей ключевого участка (рис. 15) проводилось на основе картограммы, созданной путем регрессионного кригинга.

По полученной карте (рис. 15) отмечается увеличение количества гумуса в верхнем слое 0-20 см ближе к краям полей, а также в ложбинах, что связано с эрозийными процессами, происходящими в регионе исследования, которые приводят к смыву почвенного материала с высоких позиций рельефа и намыву этого материала в депрессионные позиции рельефа.

Запасы гумуса в слое 0-20 см на сельскохозяйственных полях варьируют, в основном, в пределах 20-60 т/га, в среднем по полям запасы гумуса составили 40,3 т/га. Наибольшие средние запасы гумуса согласно полученной картограмме характерны для поля №3 и составляют 46 т/га, а наименьшие – для поля №2, средние запасы гумуса которого составили 36,7 т/га.

Наибольшие средние запасы гумуса характерны для дерново-подзолистых слабосмытых почв (42,6 т/га), что связано с наибольшей площадью данной условной почвенной группы, занимаемой на исследуемых полях. 37,1 т/га – средние запасы гумуса для дерново-подзолистых несмытых почв полей.

Анализ результатов показал, что чем выше степень эродированности почвы, тем меньше средние запасы гумуса для этой условной почвенной группы. Самое низкое значение запасов гумуса среди почв характерно для дерново-подзолистых сильносмытых почв, так как они активней всего подвергаются водной эрозии, что приводит, в свою очередь, к активному смыву верхнего плодородного слоя почвы.

ВЫВОДЫ

1. Почвенная карта, построенная на исследуемую территорию, включает 41 разновидность почв, которые относятся к четырем различным типам почв. Сравнение с картой, выполненной сотрудниками Уралгипрозема в 1984 г., показало, что в целом доли и границы основных почвенных типов на данной территории не претерпели существенных изменений за последние 30 лет, кроме дерново-глеевых и дерново-подзолистых намывных почв. Использование современных ГИС-систем в совокупности со снимком высокого разрешения и качественной топографической основой позволило произвести уточнение контуров почвенных выделов.

2. Моделирование пространственного распределения почвенных групп пятью методами автоматизированной классификации с обучением: множественная логистическая регрессия, деревья решений C5, метод случайного леса, регрессионные деревья, метод опорных векторов на территорию исследуемого участка показало, что наилучшим образом выделяются дерново-подзолистые слабосмытые и среднесмытые почвы. На втором месте по значениям средней точности предсказания находятся дерново-подзолистые несмытые и намывные, а также дерново-глеевые и аллювиальные почвы. Хуже всего методами автоматической классификации выделяются дерново-подзолистые сильносмытые и светло-серые лесные почвы.

3. Проверка моделей на устойчивость (кросс-валидация) показала среднюю общую точность моделирования от 48 до 61 %, а средняя каппа варьирует в диапазоне от 0,26 до 0,44. Уровень единообразия получаемых картографических материалов на основе моделей множественной логистической регрессии, характеризующихся различными коэффициентами каппа устойчивости этих моделей, самый высокий по сравнению с другими моделями.

4. Был выявлен минимальный набор ковариат, включающий характер землепользования, крутизну склона, минимальную, максимальную, вертикальную, горизонтальную, поперечную и другие кривизны, фактор длины склона и другие морфометрические характеристики, позволяющий использовать предложенные модели.

5. Сравнение цифровых карт между собой показало, что около 55 % территории классифицируются всеми методами единообразно. Наименьший процент неопределенности при классификации наблюдается для участков сельскохозяйственных полей, расположенных, в основном, на выровненных территориях с углами наклона поверхности до 3 градусов. Наибольший процент неопределенности при классификации выявлен для территорий под лесной растительностью и для территорий балок и оврагов.

6. Проверка построенных карт по случайной независимой выборке показала, что наибольшей общей точностью (82 %) обладает почвенная карта, построенная традиционными методами. Цифровые карты только приближаются к ней по общей точности, показывая значения от 45-63 % в зависимости от метода.

7. С экспертной точки зрения и по количественным характеристикам цифровые почвенные карты, построенные на основе моделей деревьев решений с максимальной каппой устойчивости модели и метода опорных векторов со средней каппой устойчивости, ближе соответствуют карте 2016 г., по сравнению с другими цифровыми картами.

8. Содержание органического углерода в верхних 20 см сельскохозяйственных угодий на исследуемой территории колеблется от 0,4 % до 3,7 % (среднее - 1,0 %); в среднем по полям запасы гумуса составили 40,3 т/га. Исследование показало, что построение картограммы содержания органического углерода регрессионным кригингом снижает ошибку предсказания запасов гумуса по сравнению с ординарным кригингом примерно в два раза.

Работы, опубликованные по теме диссертации

По списку ВАК:

1. Докучаев П. М. Оценка динамики экологической ситуации районов нефтедобычи на основании данных дистанционного зондирования на примере Октябрьского района Ханты-Мансийского АО// Экология и промышленность России. 2016. № 20 (7). С. 30-35.
2. Докучаев П.М., Мешалкина Ю.Л. Определение содержания органического углерода с помощью портативного спектро-радиометра// Вестник Оренбургского государственного университета, 2016а. №10. С. 58-62.

Другие работы:

3. Докучаев П.М. Динамика экологической ситуации районов нефтедобычи в ханты-мансийском автономном округе (по данным дистанционного зондирования)// Материалы по изучению русских почв. 2014. № 8 (35). С. 135-139.
4. Докучаев П.М. Возможность использования данных дистанционного зондирования для отслеживания динамики экологической ситуации районов нефтедобычи (на примере Ханты-Мансийского Автономного Округа)// Материалы Международного молодежного научного форума ЛОМОНОСОВ-2013.— М.: МАКС Пресс, 2013. — 1 электрон. опт. диск.
5. Докучаев П.М. Почвы сельскохозяйственных угодий Глазовского района Удмуртской Республики// В кн.: Материалы между. научной конф. XVIII Докучаевские молодежные чтения Деградация и продовольственная безопасность России/ СПб.: Издательский дом С.-Петербургского государственного университета. 2015. С. 276-277.
6. Докучаев П.М. Особенности почвенного покрова сельскохозяйственных угодий Глазовского района Удмуртской Республики. Материалы Международного молодежного научного форума ЛОМОНОСОВ-2015 / — М.: МАКС Пресс, 2015. — 1 электрон. опт. диск .
7. Докучаев П.М., Мешалкина Ю.Л. Сравнение результатов почвенного картографирования: с использованием ГИС-технологий и на основе автоматизированной классификации с обучением, на примере ключевого участка Чура Глазовского района Удмуртской Республики// В сб.: Почвоведение-продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева (Белгород, 15-22 августа 2016 г.). Часть II.— Москва-Белгород: Издательский дом Белгород. 2016. С. 299-300.