На правах рукописи

Гопп Наталья Владимировна

ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЮГО-ВОСТОКЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

03.02.13 – Почвоведение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН

Официальные оппоненты:

Будажапов Лубсан-Зонды Владимирович,
доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории агрохимии и аридного земледелия, ФГБНУ Бурятский научно-исследовательский институт сельского хозяйства

Рухович Ольга Владимировна,
доктор биологических наук, заведующая лабораторией географической сети опытов, ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова

Трубников Юрий Николаевич,
доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории космических систем и технологий, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»

Ведущая организация: ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН

Защита состоится 14 апреля 2022 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 003.013.01 при Институте почвоведения и агрохимии СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, ИПА СО РАН. Тел/факс: (383) 363-90-25. E-mail: soil@issa-siberia.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПА СО РАН http://issa-siberia.ru, а также на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Автореферат разослан «____» _____ 2022 года

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах с профессиональными регалиями в конце отзыва и личной подписью, заверенной у специалиста из отдела кадров, а также печатью учреждения) просим направлять по вышеуказанному адресу.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д 003.013.01,
канд. биол. наук — Татьяна Ивановна Сиромля

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В последнее десятилетие интенсивно ведутся исследования в области цифрового картографирования (ЦК) пространственной изменчивости параметров наземных экосистем с использованием данных дистанционного зондирования Земли, которые в дополнение к традиционным контактным методам обследования позволяют значительно сократить объемы полевых работ и увеличить информативность картографических материалов. Основная задача ЦК сводится к интеграции знаний о факторах дифференциации в сочетании с данными дистанционного зондирования Земли и точечными наземными наблюдениями [Lagacherie и McBratney, 2007; Сорокина, 2012; Jiang et al., 2016; Шоба и др., 2010; Бадмаев и др., 2011; Рухович и др., 2011; Шарый, Пинский, 2013; Конюшкова, 2014; Рухович, 2016; Чинилин, Савин 2018; Чупина и др., 2018; Ерунова и др., 2019; Кириллова, Хомяков, 2020]. Современные методы цифрового картографирования находят применение в изучении разнообразия почв и растительности, а также для решения прикладных задач, например, в системах точного и адаптивно-ландшафтного земледелия. Причины возникновения пространственной неоднородности параметров почв и растительности многообразны и зависят как от внутренних, так и внешних факторов. Параметры внешних факторов успешно рассчитываются по данным дистанционного зондирования Земли, но при этом все еще остается проблема разработки новых, более эффективных, чем существующие, методов для картографирования почв, в которых параметры внешних факторов используются в качестве предикторов. Это обусловливает очевидную необходимость проведения дальнейших исследований в этом направлении. Разработка и внедрение методов цифрового картографирования позволяет автоматизировано обрабатывать большие объемы пространственно распределенных данных, что значительно увеличивает точность и скорость обработки информации, при этом сохраняется возможность модификации алгоритмов при поступлении дополнительных сведений о картографируемом объекте. Таким образом, актуальность настоящей диссертационной работы определяется необходимостью развития методических подходов цифрового картографирования и получения новых знаний о происходящих изменениях в компонентах ландшафта.

Цель исследований – разработать методы цифрового картографирования и установить закономерности пространственной изменчивости параметров почв и растительности с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Задачи исследований:

1. Модифицировать алгоритм для автоматизированного почвенного картографирования (М 1 : 100 000) и разработать способ оценки точности карт; выявить закономерности пространственной дифференциации почв естественных ландшафтов.
2. Разработать методику крупномасштабного (М 1 : 5000) картографирования физических и химических свойств пахотного горизонта почв на основе индикаторов, рассчитываемых по мультиспектральным снимкам и цифровым моделям высот; провести сравнительную оценку физических и химических свойств агропочв, занимающих различные геоморфологические позиции.
3. Обосновать подход к крупномасштабному (М 1 : 5000) картографированию степени окультуренности агропочв и провести сравнительную оценку пахотного горизонта, отличающегося по содержанию гумуса.

4. Выявить причины пространственной изменчивости продуктивности яровой пшеницы и разработать методику цифрового картографирования урожайности на основе угловых и дистантных вегетационных индексов.

5. Разработать почвенно-геоморфологическую базу данных для картографирования и выявления закономерностей пространственной изменчивости содержания гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв и почвообразующей породе.

Научная новизна. Разработан метод для картографирования почв, позволяющий в автоматизированном режиме создавать цифровые почвенные карты с использованием параметров индикаторов, рассчитываемых по данным дистанционного зондирования Земли.

На основе полученных линейных моделей предложены методики картографирования физических и химических свойств почв, а также биометрических параметров растительности. С использованием полученных карт установлено, что почвы склонов, сформированные на одинаковых почвообразующих породах, характеризуются значительной пространственной неоднородностью химических и физических свойств, которая обусловлена различным сочетанием факторов почвообразования и действием почвенных процессов.

Разработана методика и программное обеспечение для цифрового картографирования степени окультуренности агропочв. На основе сравнительной оценки полученных карт выявлено, что сильно- и среднегумусированные почвы (черноземы, темно-серые и серые) могут иметь одинаковую степень окультуренности, связанную с более высоким содержанием элементов питания (фосфора и калия) в менее гумусированных почвах.

С использованием пространственно распределенных данных об изменении свойств почв установлены причины неравномерной урожайности яровой пшеницы, которые связаны, прежде всего, с уровнем предпосевной влаги.

Разработанная почвенно-геоморфологическая база данных позволила провести картографирование и установить закономерности пространственной изменчивости содержания гумуса, физической глины и ила в почвах. Выявлены тренды увеличения содержания гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв с северо-востока на юго-запад изучаемой территории. Аналогичный тренд отмечен и для топографического индекса влажности. Для содержания физической глины и ила в почвообразующей породе установлены противоположные тренды, то есть отмечено увеличение содержания физической глины и ила с юго-запада на северо-восток. С использованием новой классификации форм рельефа установлено, что почвы, занимающие долины рек и равнины, по сравнению с почвами привершинных склонов и высоких гребней холмов характеризуются более высоким содержанием гумуса, физической глины и ила.

Защищаемые положения:

1. Разработанный метод картографирования почв, включающий предварительное составление тематических карт параметров индикаторов, позволяет с использованием экспертных решений выделять ареалы почв в автоматизированном режиме.

2. Разработанная методика цифрового картографирования степени окультуренности почв, включающая предварительное составление карт относительных индексов агрохимических свойств, позволяет оценивать пригодность почв для возделывания сельскохозяйственных культур, а также определять

географическое расположение ареалов почв с дефицитом элементов минерального питания растений.

3. Линейные регрессионные модели, составленные с использованием в качестве индикаторов вегетационных индексов NDVI, CTVI, SAVI и MSAVI2, одинаково эффективны для цифрового картографирования урожайности яровой пшеницы, так как средние относительные абсолютные ошибки моделей практически одинаковы.

Теоретическая и практическая значимость. Разработаны и апробированы методики автоматизированного цифрового картографирования параметров почв и растительности, обеспечивающие возможность: 1) быстрой обработки пространственно распределенной информации; 2) модификации алгоритмов при поступлении дополнительных сведений об объекте исследования; 3) оценки закономерностей пространственной дифференциации почв и их физических и химических свойств; 4) организации сбалансированного минерального питания растений; 5) организации мониторинга за состоянием почвенно-растительного покрова. Результаты, полученные в диссертационной работе, развивают теоретические и практические основы цифрового почвенного, агрохимического и геоботанического картографирования. Результаты исследований могут быть использованы при разработке системы точного земледелия и нормативных природоохранных документов, служить информационной основой при планировании региональных экологических программ и проведении природоохранных мероприятий, а также для организации учебного процесса в ВУЗах и ознакомления с цифровыми технологиями, применяемыми в картографии.

Личный вклад автора. Автором осуществлена постановка проблемы и методическая разработка путей ее решения, проведены полевые и камерально-аналитические работы, разработаны алгоритмы и методики средне- и крупномасштабного картографирования, проведена векторизация тематических карт и интерпретация полученных результатов, анализ материалов и их публикация. Результаты диссертационного исследования получены автором и соавторами в рамках проведения плановых НИР: «Эколого-генетические основы структурно-функциональной организации почвенного покрова Сибири: динамика, ресурсный потенциал и оптимизация использования», «Пространственно-временные закономерности эволюции и функционирования почв Сибири», «Биологические и биогеохимические функции почв как компонента наземных экосистем Сибири».

Апробация работы. Результаты работы представлялись и обсуждались на всероссийских научно-практических конференциях, съездах и научных семинарах: «Почвы – национальное достояние России» (Новосибирск, 2004); «Гео-Сибирь» (Новосибирск 2005-2009), «Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века» (Новосибирск, 2017), «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019)» (Бердск, 2019), «Региональные системы комплексного дистанционного зондирования агроландшафтов» (Красноярск, 2019), «Актуальные проблемы устойчивого развития агроэкосистем (почвенные, экологические, биоценотические аспекты)» (Ялта, 2019), OPENBIO-2019 (Кольцово, 2019) и др..

Публикации. По теме диссертации опубликовано 50 печатных работ, в том числе 19 статей в рецензируемых журналах входящих в перечень ВАК и РИНЦ, из них 9 статей индексированы в базе данных SCOPUS и/или WoS. Зарегистрировано авторское свидетельство на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, выводов и списка использованной литературы. Работа изложена на 269 страницах, содержит 36 таблиц, 63 рисунка, 3 приложения. Библиографический список использованной литературы включает 315 источников, в том числе 111 работ зарубежных авторов.

Благодарности. Выражаю искреннюю благодарность Лащинскому Н.Н., Нечаевой Т.В., Савенкову О.А., Смирновой Н.В., Смирнову А.В., Смирнову В.В., а также сотрудникам лаборатории географии и генезиса почв, агрохимии, биогеохимии. Особую благодарность выражаю Шарому П.А., Смоленцеву Б.А. и Якименко В.Н. за ценные советы и рекомендации.

Глава 1. Цифровое картографирование почвенно-растительного покрова: исторический обзор и современное состояние

Развитие аэрокосмических исследований системы «почва-растительность» осуществляется в двух направлениях. С одной стороны, создаются теоретические основы нахождения взаимосвязей между данными дистанционных наблюдений и параметрами, характеризующими состояние почвенно-растительного покрова; с другой стороны, ведется разработка методов спектрометрических и фотометрических измерений, создается соответствующая измерительная аппаратура, систематизируются результаты исследований [Кондратьев и др., 1986; Ahmadian et all, 2016]. Обзор литературы свидетельствует, что благодаря достижениям в области дистанционного зондирования Земли стало возможным использование большого количества цифровых пространственно распределенных данных [Дейвис и др., 1983; Precision Agriculture, 2005]. Анализ этих данных позволяет решать не только фундаментальные задачи в почвоведении, но и практические, например, такие как контроль за состоянием компонентов окружающей среды, оценка природных ресурсов и их рациональное использование [McBratney et al., 2003; Lagacherie, McBratney, 2007]. Анализ литературных данных показал, что в области цифрового картографирования достигнут значительный прогресс, разработаны методические подходы, позволяющие проводить сопряженный многофакторный анализ пространственно распределенных данных с использованием экспертных решений [Lamsal et al., 2006; Сорокина, 2012; Гопп, 2015; Gopp, 2015; Ballabio et al., 2012; Mondal et al., 2016; Kumar et al., 2016; Ahmadian et all, 2016; Jiang et al., 2016; Zeraatpisheh et al., 2017; Докучаев, 2017; Чинилин, Савин 2018]. Однако достигнутый прогресс в области ЦПК остается недостаточным как для России в целом, так и ее различных почвенно-климатических зон, поэтому необходимо продолжать исследования в этом направлении и разрабатывать современные методы, которые позволяют в автоматизированном режиме обрабатывать данные дистанционного зондирования Земли, идентифицировать и оценивать разнообразие компонентов ландшафта.

Глава 2. Объекты и методы исследований

Объектами исследования послужили почвы и растительность юго-восточной части Западной Сибири. Анализ почвенных и растительных образцов проводили

стандартными общепринятыми методами [Агрохимические…, 1975; Soil sampling…, 2008; Manual for Soil Analysis..., 2005].

В процессе создания методов цифрового картографирования параметров почв и растительности использовали регрессионное и геостатистическое моделирование, а также алгоритм дерево решений для составления почвенной карты, подробное описание которого представлено в третьей главе автореферата.

При использовании регрессионного метода моделирования построение карт проводилось в несколько этапов: 1) лабораторно-полевые исследования; 2) создание регрессионной модели зависимости параметров почв и растительности от различных предикторов, рассчитанных по данным дистанционного зондирования Земли; 3) построение карт с использованием моделей, созданных экспертом на первом этапе; 4) конвертация карт в формат GeoTiff для составления производных тематических карт с использованием разработанной программы ZChanger; 5) наложение точек контрольной выборки на карту и оценка точности прогноза. В качестве предикторов использовали различные параметры, рассчитываемые по данным дистанционного зондирования Земли (Landsat 7, Landsat 8 OLI, SPOT 4, SRTM, ASTER GDEM).

При использовании геостатистического метода моделирования построение карт проводилось в несколько этапов: 1) лабораторно-полевые исследования; 2) построение семивариограмм на основе географических и лабораторно-аналитических данных; 3) подбор моделей семивариограмм и построение интерполяционных карт; 4) конвертация карт в формат GeoTiff для составления производных тематических карт с использованием разработанной программы ZChanger; 5) наложение точек контрольной выборки на карту и оценка точности прогноза.

Глава 3. Цифровое картографирование почв естественных ландшафтов (на примере юго-западной части Джулукульской котловины, Республика Алтай)

Основная методическая проблема почвенной картографии связана с невозможностью прямой инвентаризации ареалов почв. Закономерности пространственной организации почв выявляются по доступным для наблюдения факторам дифференциации почвенного покрова: рельефа, климата, почвообразующих пород, живых организмов, хозяйственной деятельности, пространственного положения [Козлов, Сорокина, 2012]. В настоящее время цифровое картографирование почв на основе параметров, рассчитываемых по мультиспектральным снимкам и цифровым моделям высот, с методической точки зрения, недостаточно проработано, что обусловливает необходимость в разработке новых подходов в картографии почв.

На территории исследования встречаются различные типы почв из отдела альфегумусовых и железисто-метаморфических (рис. 1), а также параметры растительности и рельефа. На изучаемой территории преобладают альпийско-луговые и горно-тундровые формации растительности. Почвенное картографирование проведено в масштабе 1: 100 000 [Gopp, 2015].

На основе данных о рельефе, запасах фитомассы, увлажненности и почвообразующих породах разработан алгоритм дерево решений и проведено картографирование ареалов почв (рис. 1, 2). Среди рассчитанных растровых тематических карт выявлены наиболее значимые косвенные индикаторы границ почвенных ареалов на уровне типа и подтипа почв, к которым относятся: запасы

надземной фитомассы, основные формы земной поверхности (холмы, выпуклые склоны, вогнутые седловины, депрессии) и увлажненность [Гопп, 2013; Гопп, 2015]. Установлено, что эти признаки могут использоваться только для выделения пространственных границ, и не позволяют идентифицировать классификационную принадлежность почв без полевых обследований, так как они строго не приурочены к тем или иным разновидностям и могут, в свою очередь, встречаться на других территориях, но уже с другими почвами.

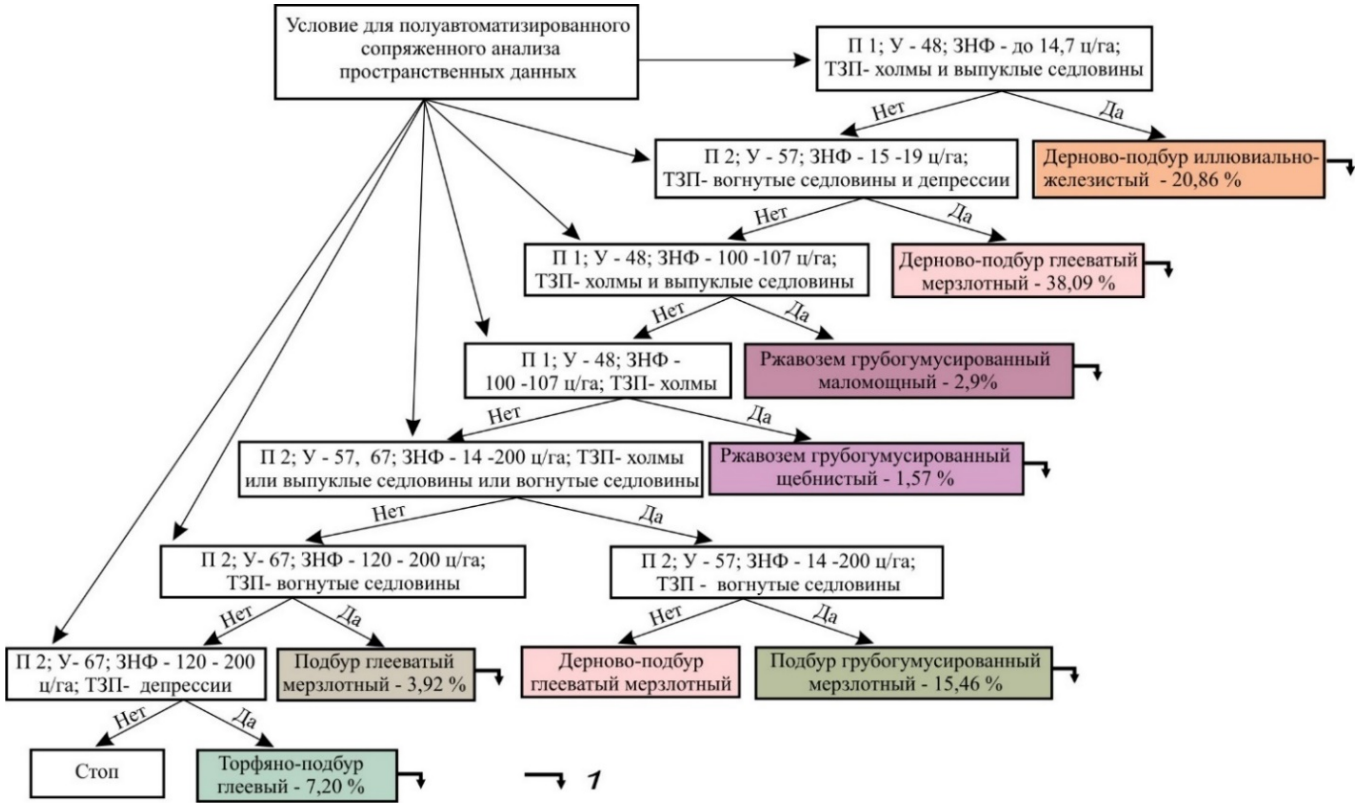


Рис. 1. Схема алгоритма дерево решений. Условные обозначения: П1 – элювий и делювий коренных пород; П2 – мерзлые моренные отложения; ЗПФ – запасы наземной фитомассы; ТЗП – типы земной поверхности; У – увлажненность (48 – класс сухо-лугового увлажнения; 57 – класс влажно-лугового увлажнения; 67 – класс сыролугового увлажнения).

Выявлено, что пространственная дифференциация почв на уровне типа и подтипа связана с формами рельефа, запасами надземной фитомассы, увлажненностью, породным и гранулометрическим составом почвообразующих пород, наличием мерзлоты. Дерново-подбуры иллювиально-железистые формируются на высоких грядах и возвышенностях, где отсутствует мерзлота. Почвообразующими породами служит элюво-делювий магматических и метаморфических пород. Для этих почв характерно сухо-луговое увлажнение. Произрастающая на этих почвах разнотравно-злаковая травянистая тундра характеризуется запасами надземной фитомассы до 14 ц/га. Дерново-подбуры глееватые мерзлотные формируются в депрессиях на пылевато-песчаных озерно-ледниковых отложениях, находящихся в мерзлом состоянии. Дополнительный источник влаги при сезонном оттаивании мерзлоты способствует увеличению запасов надземной фитомассы разнотравно-злаковой травянистой тундры до 15-19 ц/га.

Подбуры грубогумусированные мерзлотные распространены в вогнутых седловинах аккумулятивной части катены. Почвообразующими породами служат озерно-ледниковые отложения, находящиеся в мерзлом состоянии. Для этих почв характерно влажнолуговое увлажнение. На них произрастает как разнотравно-злаковая травянистая тундра, так и кустарниковая ерниковая тундра, которые характеризуются большими запасами надземной фитомассы в связи с наличием дополнительного источника влаги.

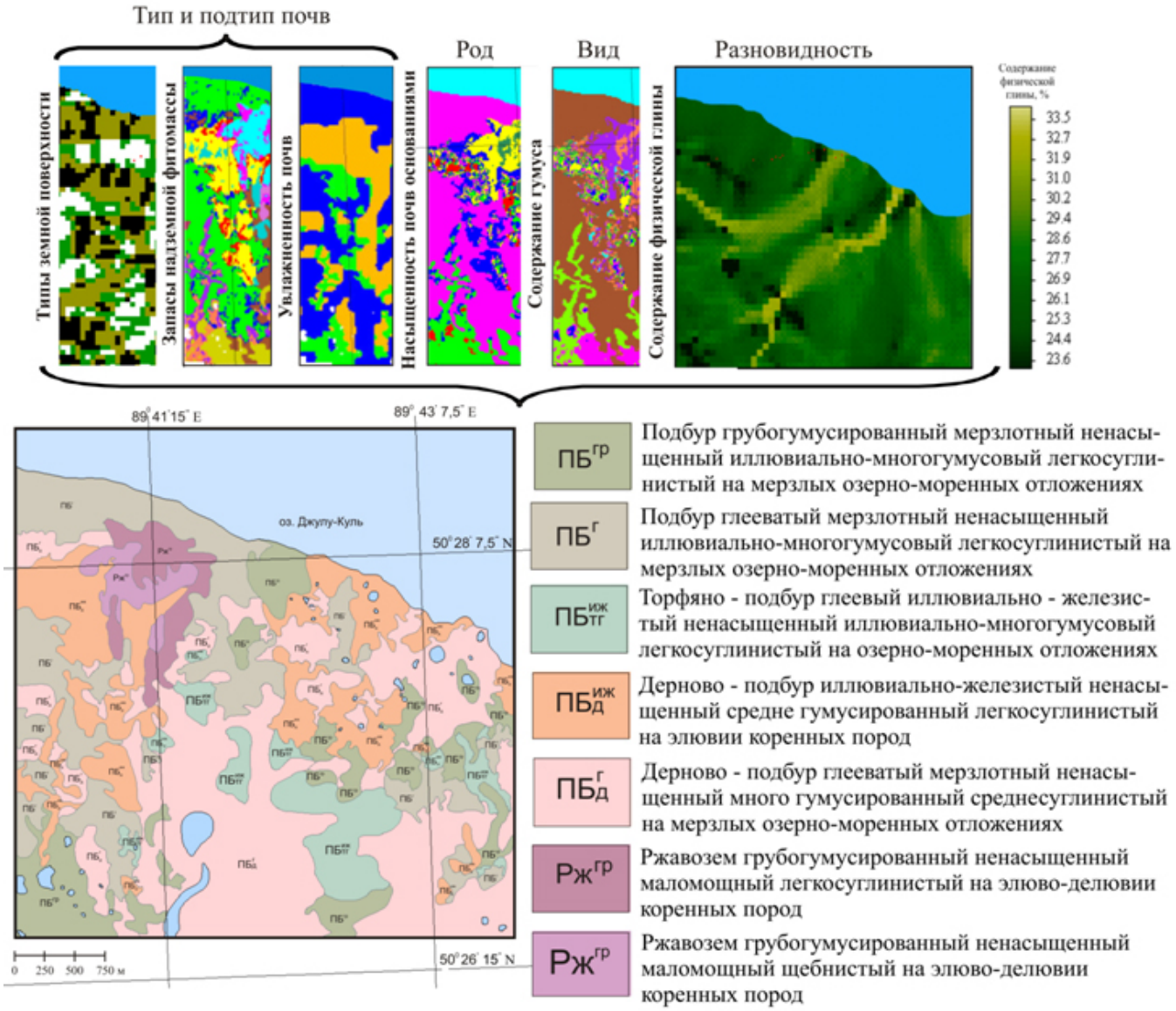


Рис. 2. Тематические карты, используемые в алгоритме (растровое представление данных), и почвенная карта территории исследования.

Подбуры глееватые мерзлотные формируются в вогнутых седловинах на озерно-ледниковых отложениях, находящихся в мерзлом состоянии. Для этих почв характерно сыролуговое увлажнение. На этих почвах произрастает преимущественно кустарниковая ерниковая тундра с запасами надземной фитомассы от 120 до 200 ц/га.

Ржавоземы грубогумусированные распространены на выпуклых склонах. Почвообразующими породами служит элюво-делювий магматических и метаморфических пород. Для этих почв характерно сухолуговое увлажнение.

Произрастающая на ржавоземах кустарниковая ерниковая тундра характеризуется сравнительно меньшими запасами надземной фитомассы (100-107 ц/га).

Выявлена зависимость между количественными параметрами почв, характеризующими род (по степени насыщенности основаниями) и вид (по содержанию гумуса) с запасами надземной фитомассы. Установлена зависимость между содержанием физической глины и параметрами рельефа (максимальная кривизна, высота, площадь максимального сбора), рассчитаны уравнения регрессий и соответствующие тематические карты (рис. 2).

Для оценки точности выделенных географических ареалов почв использовалась контрольная почвенная карта, составленная классическим ручным способом. Качественная оценка результатов сопряженной классификации тематических слоев на уровне типа и подтипа почв производилась на основе матрицы погрешностей. Согласно матрице погрешностей, из 37537 пикселей правильно были идентифицированы 35227 (табл. 1).

Таблица 1. Матрица ошибок классификации, количество пикселей

Фактический класс на контрольной карте	Расчетный класс на анализируемой карте						
	ПБд^{ИЖ}	ПБд^{Г}	ПБ^{ГР}	ПБ^{Г}	ПБтг^{ИЖ}	РЖ^{ГР}	Всего для контрольной карты
ПБд^{ИЖ}	**3600**	195	53	30	0	9	3887
ПБд^{Г}	211	**16 913**	90	226	300	160	17 900
ПБ^{ГР}	0	134	**3340**	57	28	0	3559
ПБ^{Г}	0	187	121	**5665**	20	0	5993
ПБтг^{ИЖ}	0	219	0	144	**3848**	0	4211
РЖ^{ГР}	87	39	0	0	0	**1861**	1987
Всего для анализируемой карты	3898	17687	3604	6122	4196	2030	**35227**

Условные обозначения: ПБд^{ИЖ} – Дерново-подбур иллювиально-железистый; ПБд^{Г} – Дерново-подбур глееватый мерзлотный; ПБ^{ГР} – Подбур грубогумусированный мерзлотный; ПБ^{Г} – Подбур глееватый мерзлотный; ПБтг^{ИЖ} – Торфяно-подбур глеевый иллювиально-железистый; РЖ^{ГР} – Ржавозем грубогумусированный.

Таким образом, общая точность классификации для всей карты составляет 93,8%, что больше порогового значения (85%), поэтому результаты классификации следует признать удовлетворительными. Используемые тематические карты и обучающие правила в алгоритме дерево решений содержат в себе достаточно информации для правильного распределения пикселей по классам. Разработанный алгоритм дерево решений для сопряженной классификации результатов обработки мультиспектральных снимков и цифровых моделей высот, позволяет выделять ареалы почв с определенным сочетанием признаков из разных тематических карт, параметры которых соответствуют заданным экспертом условиям.

Глава 4. Информативность морфометрических характеристик рельефа для цифрового картографирования физических и химических свойств пахотного горизонта агропочв (на примере Предсалаирской возвышенной равнины)

Влияние рельефа на почвенный покров многообразно. Прямое влияние рельефа заключается в инициировании экзогенных геологических процессов (делювиальных, пролювиальных, аллювиальных и элювиальных), сопровождающихся распределением почвенной массы по поверхности Земли, в результате чего образуются зоны аккумуляции и выноса биофильных элементов и почвенных частиц. Косвенное влияние рельефа заключается в перераспределении климатических параметров: теплоты, света, влаги, ветра [Неуструев, 1977; Джеррард, 1984; Ласточкин, 1991; Шарый, 2006]. В настоящее время закономерности изменения физических и химических свойств почв в зависимости от морфометрических характеристик рельефа, рассчитываемых по цифровым моделям высот, изучены довольно слабо, что обусловливает необходимость проведения исследований в этом направлении.

На экспериментальном участке выделены следующие склоновые позиции: первая (170-190 м) и вторая (130-170 м) высотные ступени. Первую высотную ступень (ВС1) занимает агросерая почва с содержанием гумуса в пахотном горизонте 1,5-3,0%, вторую высотную ступень (ВС2) – агросерая абрадированная с содержанием гумуса 1,5-1,9%. В качестве предикторов свойств почв применяли следующие морфометрические параметры рельефа (МПР): абсолютную высоту (*Z*), крутизну склонов (*GA*), освещенность (*F*), горизонтальную кривизну (*kh*), вертикальную кривизну (*kv*), максимальную кривизну (*k*max), минимальную кривизну (*k*min), среднюю кривизну (*H*), ротор (*rot*), полную гауссову кривизну (*K*), полную кольцевую кривизну (*KR*), площадь максимального сбора (*MCA*). Вышеперечисленные параметры рельефа рассчитаны по цифровой модели высот ASTER GDEM v.2 (разрешение 30 м) в программе «Аналитическая ГИС Эко» [Шарый, 2006].

В регрессионных моделях морфометрические параметры рельефа объяснили 59% вариации содержания физической глины, 42% – влажности, 46% – гумуса, 31% – общего азота, 28% – нитратного азота, 40% – подвижного фосфора, 45% – обменного калия, 67% – обменного кальция, 40% – обменного магния, 42% – pH водной суспензии (табл. 2). На пространственную вариацию свойств пахотного горизонта агросерой почвы склона опосредованное влияние оказывали МВ рельефа, описывающие поверхностный сток, геометрические формы и терморежим. В почве на ВС2 по сравнению с ВС1 отмечено статистически значимое уменьшение влажности, содержания физической глины, гумуса, общего азота и обменного калия (табл. 3, рис. 3, 4). Снижение содержания нитратного азота, подвижного фосфора, обменного кальция и магния в почве на ВС2 по сравнению с ВС1 не подтверждено (табл. 3, рис. 4, 5). Таким образом, выявлена информативность морфометрических параметров рельефа, рассчитанных по цифровой модели высот, для прогнозного картографирования пространственной изменчивости свойств пахотного горизонта агросерой почвы склона. Эрозионные процессы и различия в гидротермических условиях (влажности, освещенности) на склоновых землях, инициируемые МВ рельефа, совместно с антропогенной нагрузкой (вспашкой) оказывают существенное влияние на пространственную изменчивость почвенных свойств. Анализ корреляций между свойствами почв выявил наличие сопряженной зависимости между

отдельными показателями, что говорит об их тесном взаимодействии в процессе почвообразования.

Таблица 2. Регрессионные модели для прогноза пространственной изменчивости свойств пахотного горизонта (0-30 см) почв с использованием МПР

Почвенные свойства	Регрессионная модель	r, (p)	r^2
Влажность	–372,82 × kv + 32,17 × rot + 0,0986 × Z – 5,2289	0,65 ($p<10^{-4}$)	0,42
Физическая глина	–150,06 × kmin – 76647,22 × KA + 0,1020 × Z + 13,3034	0,77 ($p<10^{-6}$)	0,59
Гумус	–92,9152 × kmax + 0,0239 × Z + 0,00298 × F (35, 200) – 1,87183	0,68 ($p<10^{-4}$)	0,46
Общий азот	–2,655068 × kv + 0,000607 × Z + 0,000969× F (35,200) – 0,005876	0,56 ($p<10^{-3}$)	0,31
Нитратный азот	28928,7 × KR – 0,047534 × GA – 0,014319 × F (35,220) + 3,929995	0,53 ($p<0,01$)	0,28
Подвижный фосфор	–17895,3235 × H – 4683,0076 × rot – 16,8769 × MCA + 482,5826	0,63 ($p<10^{-3}$)	0,40
Обменный калий	–243,3416 × kv – 0,45407 × MCA – 0,020014 × F (35,180) + 10,4489	0,67 ($p<10^{-4}$)	0,45
Обменный кальций	–385,403044 × kmax – 45183,505711 × KA + 0,080189 × Z – 3,882438	0,82 ($p<10^{-6}$)	0,67
Обменный магний	–155,063356 × H + 0,041222 × Z + 0,060401 × GA – 6,319529	0,63 ($p<10^{-3}$)	0,40
$pH_{вод}$	– 49,283385 × kh + 0,012519 × Z – 0,00837 × F (35,200) + 3,899876	0,65 ($p<10^{-4}$)	0,42

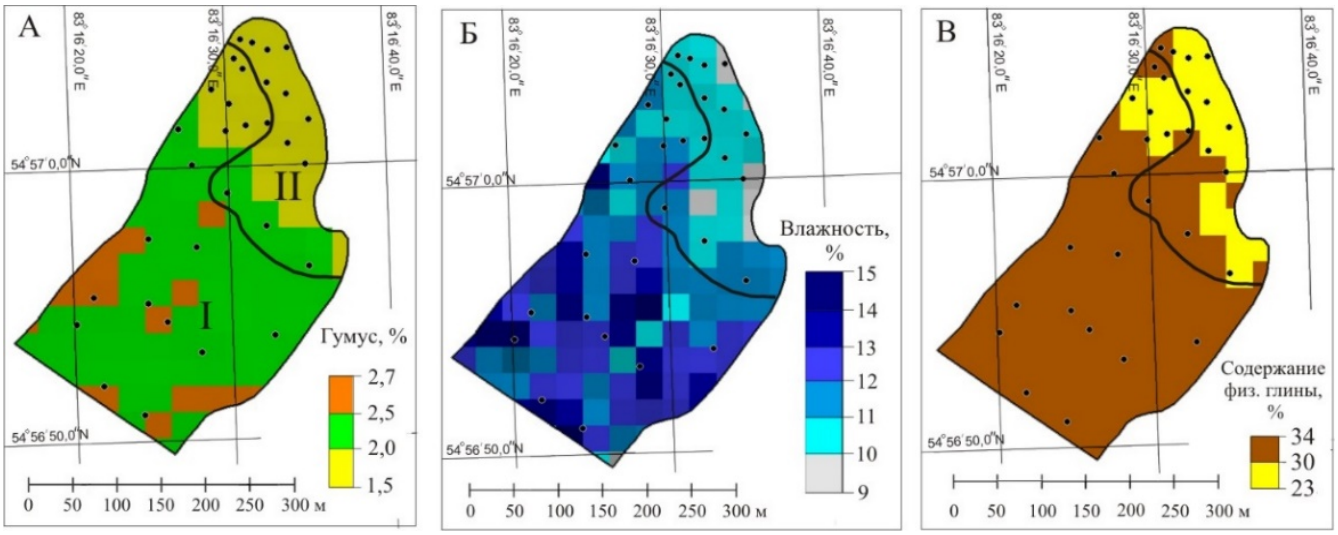


Рис. 3. Прогнозные карты содержания в пахотном горизонте почв: А – гумуса; Б – влажности; В – физической глины. Высотные ступени: I – первая, II – вторая.

Таблица 3. Варьирование свойств агросерой почвы в различных частях склона

Свойства пахотного горизонта почв	Высотные ступени	
	ВС1 (170-190 м), n=19	ВС2 (130-170 м), n=12
Влажность, %	12,1 ± 1,9*	10,1 ± 1,4
Гумус, %	2,2 ± 0,5**	1,7 ± 0,3
Физическая глина, %	31,3 ± 1,8*	29,2 ± 1,4
$N_{общ}$, %	0,15 ± 0,03**	0,12 (0,09; 0,14)
$N\text{-}NO_3$, мг/кг	2,8 (2,6; 2,9)	2,7 ± 0,3
$P_{подв}$, мг P_2O_5/кг	293 (277; 322)	274 (263;297)
$K_{обм}$, мг K_2O/кг	58 (48; 65)*	43 (41; 51)
$Ca_{обм}$, смоль(экв)/кг	8,6 ± 2,01	7,7 ± 1,1
$Mg_{обм}$, смоль(экв)/кг	1,4 (1,1; 1,6)	1,2 ± 0,1
pH водный	5,6 ± 0,2	5,5 ± 0,15

Примечание: для данных с нормальным распределением – среднее и стандартное отклонение (M±s); с ненормальным – медиана и квартили (Q_1; Q_3); * – отличия значимы ($p<0,01$) от соответствующих значений на ВС2, ** – отличия значимы при $p<0,05$.

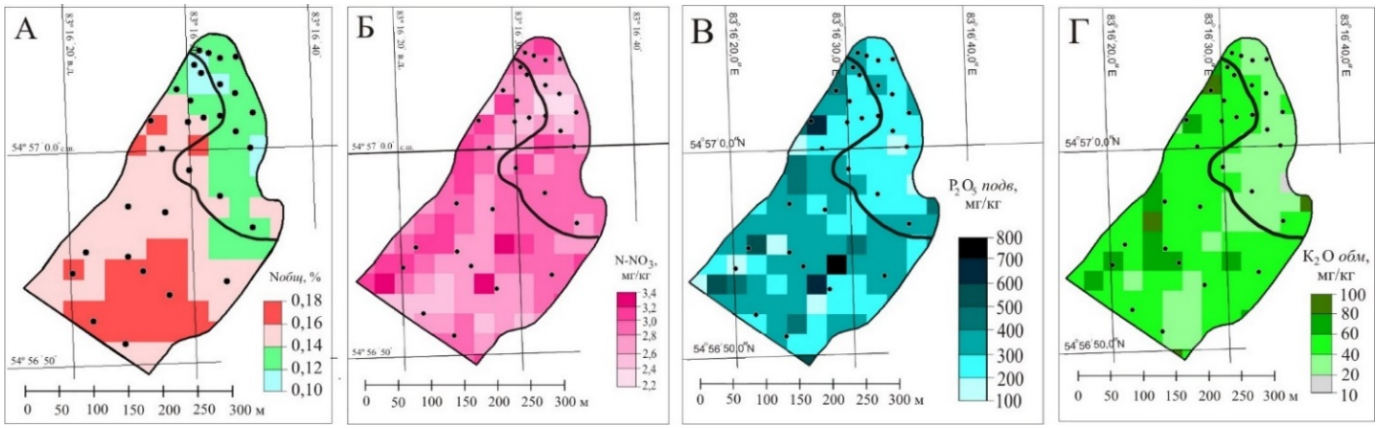


Рис. 4. Прогнозные карты содержания в пахотном горизонте почв: А – общего азота; Б – нитратного азота; В – подвижного фосфора, Г – обменного калия.

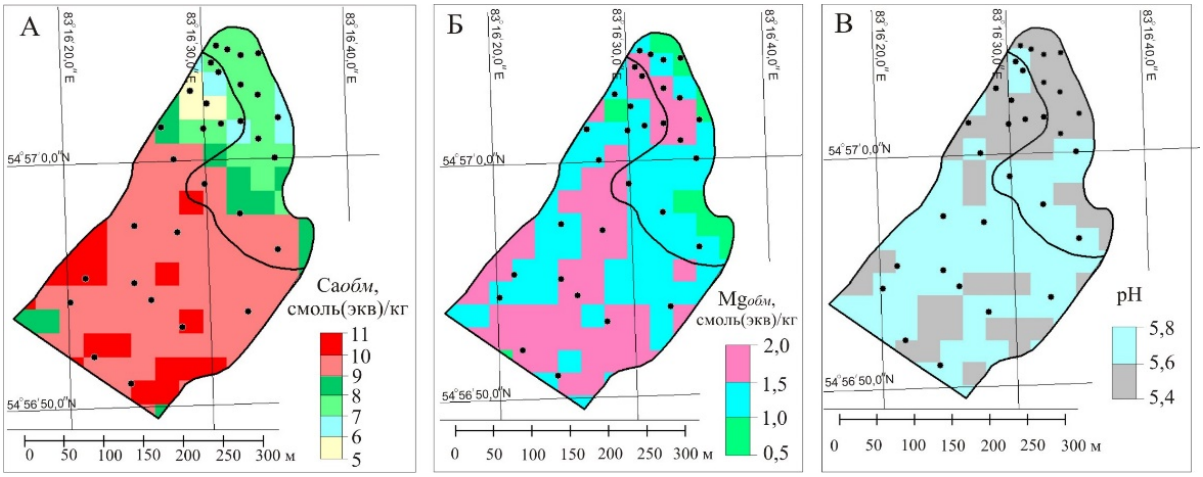


Рис. 5. Прогнозные карты содержания в пахотном горизонте почв: А – обменного кальция; Б – обменного магния; В – pH водной суспензии.

Глава 5. Информативность вегетационного индекса NDVI для цифрового картографирования физических и химических свойств пахотного горизонта агропочв (на примере Предсалаирской возвышенной равнины)

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) можно использовать в качестве косвенной характеристики актуального плодородия почв, опосредованного индикатора физических и химических свойств почв, а также в качестве базовой картографической основы для моделирования и составления производных цифровых тематических карт [Гопп, 2013; Савин и др., 2015; Gopp et all., 2017].

На обследованном участке выделены следующие склоновые позиции: первая (280-310 м) и вторая (240-280 м) высотные ступени, а также эрозионная ложбина стока. На первой высотной ступени (ВС1) распространены преимущественно сильногумусированные агрочерноземы глинисто-иллювиальные элювиированные с содержанием гумуса 5-8%, на второй высотной ступени (ВС2) – среднегумусированные (черноземы глинисто-иллювиальные элювиированные и темно-серые) с содержанием гумуса 3-5%. В качестве предиктора свойств почв использован NDVI посевов овсяно-гороховой смеси. В регрессионных моделях показатель NDVI объяснил 52% вариации содержания гумуса, 35 и 24% – общего и нитратного азота, 19, 28 и 29% – общего, органического и подвижного фосфора, 25 и 50% – обменных кальция и магния, 30 и 29% – мелкой пыли и влажности соответственно (рис. 6).

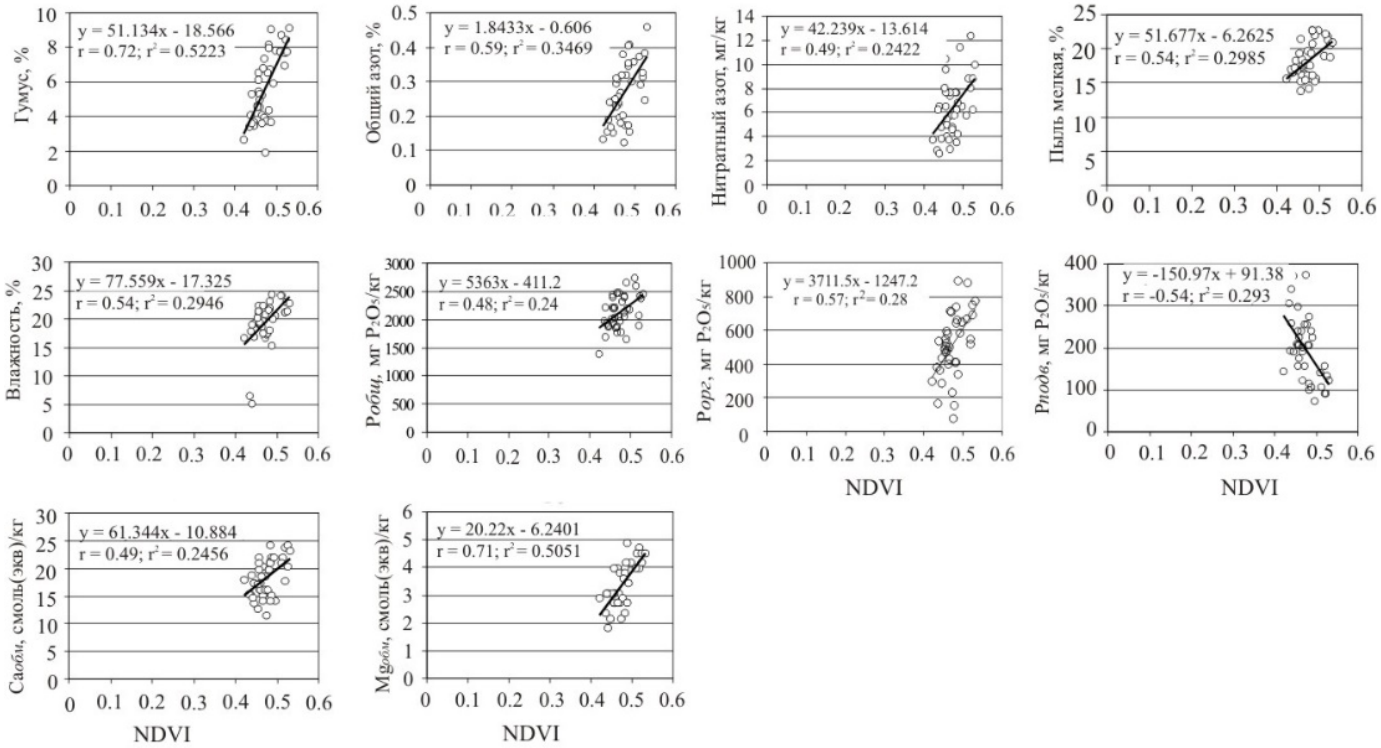


Рис. 6. Регрессионные модели зависимости между свойствами пахотного горизонта почв и NDVI (n=39; p <0,001)

На основе полученных моделей построены прогнозные карты свойств почв (рис. 7, рис. 8), для которых в качестве индикатора и базовой картографической основы послужили данные пространственного распределения NDVI.

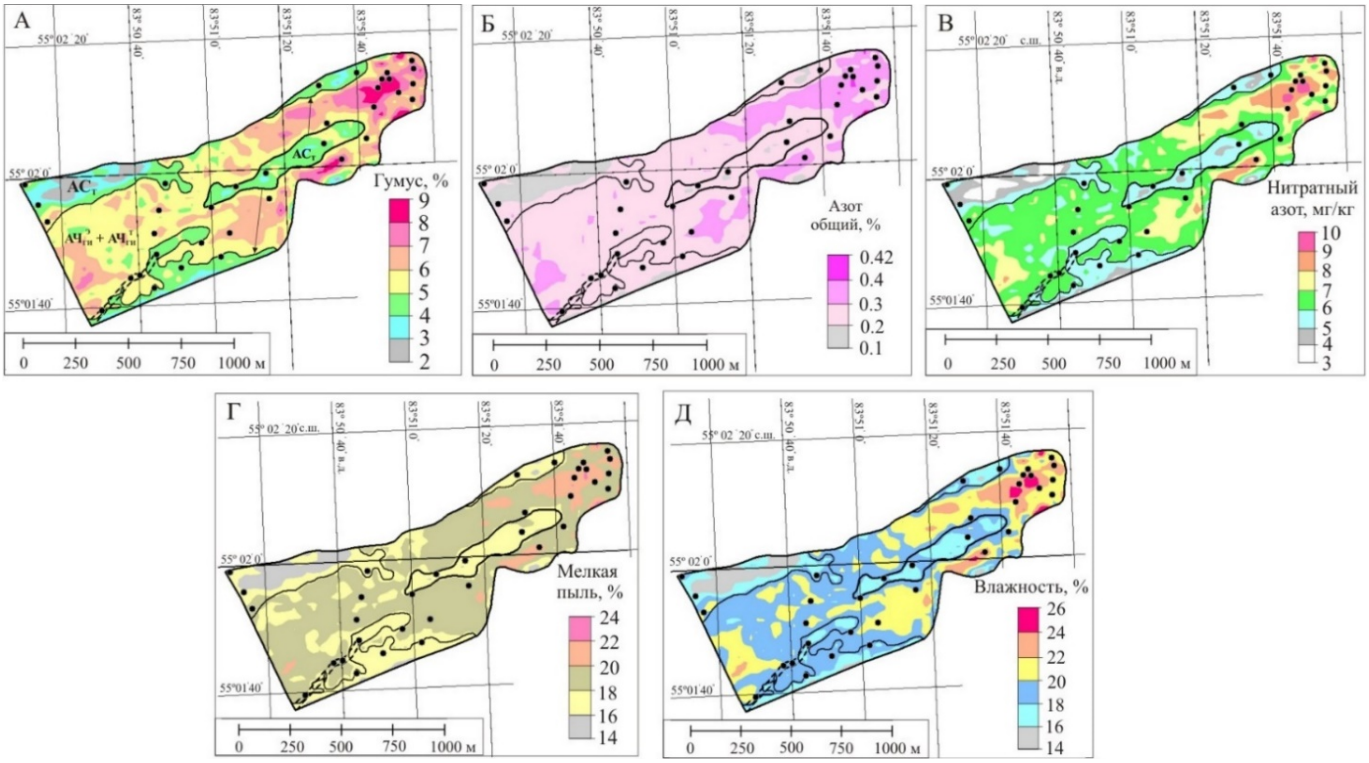


Рис. 7. Прогнозные карты содержания в пахотном горизонте почв: А – гумуса; Б – общего азота; В – нитратного азота; Г – мелкой пыли; Д – влажности. Обозначения почв: $АЧ_{ГИ}^{Э}$ – агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный; $АЧ_{ГИ}^{Т}$ – агрочернозем глинисто-иллювиальный тёмноязыковатый; $АС_{Т}$ – агротемно-серая.

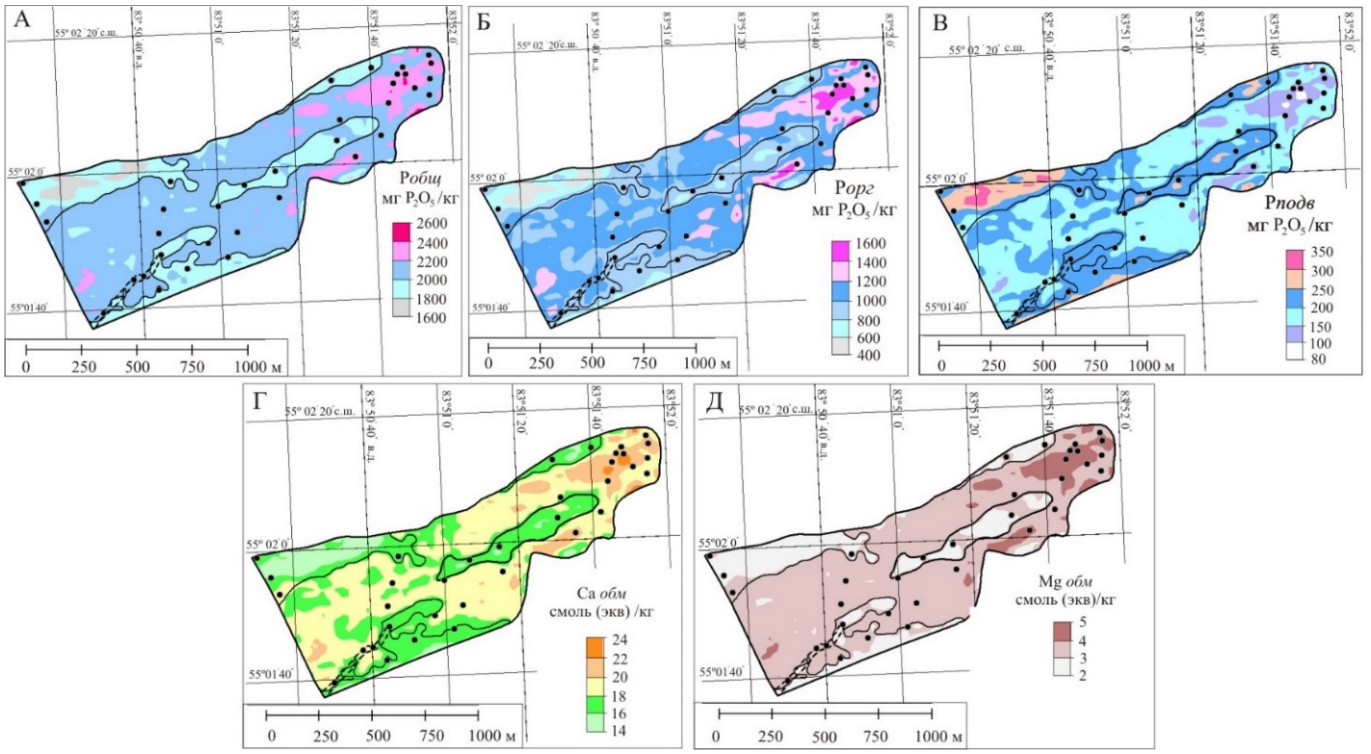


Рис. 8. Прогнозные карты содержания в пахотном горизонте почв: А – общего фосфора; Б – органического фосфора; В – подвижного фосфора; В – обменного кальция; Г – обменного магния.

Установлено, что показатель NDVI, влажность и содержание гумуса, физической глины, мелкой пыли, общего и нитратного азота, общего и органического фосфора, обменных кальция и магния в пахотном горизонте почв второй высотной ступени ниже по сравнению с первой высотной ступенью (табл. 4, рис. 7, 8). В ложбине стока все вышеперечисленные показатели свойств почв значительно ниже по сравнению с первой высотной ступенью, в то время как среднее значение NDVI сопоставимо с таковым на первой высотной ступени. Обратная тенденция отмечена в распределении подвижного фосфора – в почвах второй высотной ступени и ложбины стока по сравнению с первой высотной ступенью его содержание было выше в 1,8 и 2,4 раза соответственно. Различия по pH водной суспензии, содержанию легкоподвижного фосфора и ила в почвах сравниваемых склоновых позиций недостоверны (табл. 4).

Корреляционная связь между содержанием легкоподвижного фосфора и запасами надземной фитомассы положительная (r_s=0,41). Это единственный показатель, из всех рассмотренных свойств почв, который коррелировал с запасами надземной фитомассы. Оценка точности прогноза содержания гумуса в почвах удовлетворительная (ошибка 28,5%), общего и нитратного азота – удовлетворительная (28,0 и 31,6%), общего, органического и подвижного фосфора – удовлетворительная (20,5; 28,9 и 20,5%), обменных кальция и магния – хорошая (14,4 и 15,0%), мелкой пыли и влажности – хорошая (9,6 и 19%).

Таблица 4. Варьирование свойств пахотного горизонта почв и параметров растительности на различных склоновых позициях

Почвенные свойства	Склоновые позиции		
	ВС1 (n=16)	ВС2 (n=19)	ложбина стока (n=4)
Гумус, %	7,4 ± 1,5	4,7 ± 1,2*	3,0 ± 1,5*
$N_{общ}$, %	0,34 ± 0,06	0,22 ± 0,06*	0,17 ± 0,06*
$N\text{-}NO_3$, мг/кг	7,6 ± 1,9	5,7 ± 2,5*	4,8 ± 1,4*
$P_{общ}$, мг P_2O_5/кг	2281 ± 291	2011 ± 277*	2009 ± 316*
$P_{орг}$, мг P_2O_5/кг	1510 ± 304	985 ± 325*	650 ± 289*
$P_{подв}$, мг P_2O_5/кг	130 ± 37	239 ± 57*	313 ± 49*
$P_{лп}$, мг P_2O_5/кг	0,29 (0,21;0,34)	0,39 (0,13;0,46)	0,31 (0,15; 0,46)
$Ca_{обм}$, смоль(экв)/кг	20,5 ± 2,8	16,6 ± 2,4*	14,1 ± 2,5*
$Mg_{обм}$, смоль(экв)/кг	4,0 ± 0,4	2,7 ± 0,4*	2,6 ± 0,3*
Физическая глина, %	49,9 ± 3,0	46,7 ± 4,4*	43,5 ± 1,9*
Мелкая пыль, %	20,8 ± 1,7	16,6 ± 1,3*	14,3 ± 1,3*
Ил, %	16,7 (13,9;18,7)	17,4 (13,2;19,8)	16,5 (14,1; 18,9)
$pH_{вод}$	5,8 ± 0,17	5,7 ± 0,17	5,8 ± 0,1
Влажность почвы, %	21,9 ± 1,5	17,7 ± 4,5*	17,7 ± 2,5*
NDVI	0,494 ± 0,026	0,459 ± 0,018*	0,470 ± 0,01
ЗНФ, г/м^2	133,8 ± 28,8	148,9 ± 33,5	133,7 ± 31,3

Примечание: для данных с нормальным распределением приведены среднее и стандартное отклонение (M±s); с ненормальным – медиана и квартили (Q_1;Q_3); * - значения показателей отличающихся (p<0,01) от соответствующих величин на ВС1; ЗНФ – запасы надземной фитомассы.

Таким образом, выявлена информативность показателя NDVI посевов для прогнозного картографирования свойств пахотного горизонта почв, расположенных на первой (280-310 м) и второй (240-280 м) высотных ступенях. Для ложбин стока, ширина которых меньше, чем разрешение снимка, показатель NDVI неинформативен для диагностики и картографирования свойств почв.

Глава 6. Цифровое картографирование агрохимических свойств пахотного горизонта агропочв (на примере Предсалаирской возвышенной равнины)

Закономерности пространственной изменчивости агрохимических показателей состояния почв с использованием методов цифрового картографирования изучены недостаточно. Внедрение этих методов позволяет решать как научные, так и практические задачи (выявлять закономерности пространственной неоднородности содержания элементов, определять географическое положение ареалов почв с их дефицитом, планировать мероприятия по повышению плодородия почв).

На территории исследования распространены следующие агропочвы: чернозем глинисто-иллювиальный элювиированный, чернозем глинисто-иллювиальный тёмноязыковатый, тёмно-серая и серая. Отбор индивидуальных почвенных проб (n=57) произведен из пахотного горизонта (0-30 см).

Оценка и картографирование агрохимического состояния агропочв показала, что наибольшее содержание углерода (органического и микробиальной биомассы) и азота (общего, нитратного и микробиальной биомассы) наблюдается на более влажных сильногумусированных агрочерноземах глинисто-иллювиальных элювиированных.

Установлено, что наибольшее влияние на пространственную изменчивость содержания общего, органического и подвижного фосфора по Чирикову оказывают почвенные свойства, такие как гумус, обменные кальций и магний. Корреляционная зависимость между органическим фосфором и гумусом положительная, а между подвижным фосфором и гумусом – отрицательная, что свидетельствует об его иммобилизации в более гумусированных почвах (включение в состав гумуса и труднорастворимых фосфатов кальция и магния).

Выявлено, что наибольшее содержание калия (необменного, обменного) зафиксировано в почвах с более высокими значениями влажности, физической глины и pH. Для легкообменного и водорастворимого калия подобная закономерность не выявлена. Наличие положительной корреляции между гумусом и необменным калием указывает на его большее содержание в сильногумусированных почвах, которые характеризуются более тяжелым гранулометрическим составом. На основе рассчитанных агрохимических карт разработана методика построения цифровой карты индекса и степени окультуренности пахотных почв. При расчете индекса окультуренности ($И_{ок}$), pH солевой, содержание гумуса, подвижного фосфора и обменного калия выражаются в относительных величинах, которые рассчитываются с использованием минимального и оптимального значений этих показателей в почве и с учетом потребностей возделываемой культуры в элементах минерального питания. Установлены следующие минимальные значения агрохимических показателей: pH_{KCl} – 3,5, содержание гумуса – 0,5%, подвижного фосфора (P_2O_5) и обменного калия (K_2O) – по 20 мг/кг почвы [Кулаковская, 1990]. За оптимальный уровень содержания гумуса и pH_{KCl} приняты значения свойств лучшей по качеству

почвы. В Новосибирской области такой почвой (эталоном) является чернозём средневыщелоченный среднемощный среднесуглинистый на лессовидном карбонатном суглинке [Тюменцев, 1979; Галеева, Семендяева, 2012], для которого характерны следующие показатели: pH_{KCl} – 6, содержание гумуса – 8%. За условно оптимальное содержание подвижного фосфора и обменного калия в почвах лесостепи Западной Сибири при возделывании зерновых культур приняты следующие значения: подвижного фосфора (P_2O_5) – 200 мг/кг [Аверкина и др., 2011], обменного калия (K_2O) – 300 мг/кг [Якименко, Нечаева, 2016]. Если величина показателя агрохимического свойства выше оптимального значения, то относительный индекс равен единице.

Варьирование значений $И_{pH}$ и pH_{KCl} в почвах с различной гумусированностью было незначительным (рис. 9, А, табл. 5).

Таблица 5. Параметры пахотного горизонта (0-30 см) почв и растительности

Параметры	Виды почв по содержанию гумуса			
	сильногу-мусированные	среднегумусированные		
	$АЧ_{ГИ}^{Э}$ (n = 13)	$АЧ_{ГИ}^{Э}+АЧ_{ГИ}^{Т}$ (n = 17)	$АС_{Т}$ (n = 15)	АС (n = 12)
pH_{KCl}	5,2 ± 0,1	5,2 ± 0,1	5,1 ± 0,2	5,2 ± 0,2
Гумус, %	7,8 ± 1,2	4,1 ± 1,6*	4,5 ± 1,2*	3,6 ± 0,9*
$К_{обм}$, мг K_2O/кг	243 ± 30	200 ± 31*	205 ± 41*	227 ± 57
$Р_{под}$, мг P_2O_5/кг	123 ± 34	254 ± 46*	246 ± 69*	229 ± 44*
ЗНФ, г/м^2	130,5 ± 27,6	155,5 ± 40,3	142,8 ± 30,4	143 ± 29,2
$И_{pH}$	0,68 ± 0,06	0,68 ± 0,04	0,65 ± 0,07	0,67 ± 0,06
$И_{гумус}$	0,94 ± 0,11	0,48 ± 0,2*	0,54 ± 0,15*	0,41 ± 0,12*
$И_{калий}$	0,65 ± 0,09	0,52 ± 0,1*	0,54 ± 0,14**	0,60 ± 0,16
$И_{фосфор}$	0,66 ± 0,12	1,0 ± 0,01*	0,96 ± 0,08*	0,97 ± 0,09*
$И_{ок}$	0,73 ± 0,06	0,67 ± 0,05*	0,67 ± 0,05*	0,66±0,06**

Примечание: * – отличия значимы ($p<0,01$) от соответствующих значений в сильногумусированных агрочерноземах, ** – отличия значимы при $p<0,05$; Относительные индексы pH солевого ($И_{pH}$), содержания гумуса ($И_{гумус}$), подвижного фосфора ($И_{фосфор}$) и обменного калия ($И_{калий}$). Обозначения почв: $АЧ_{ГИ}^{Э}$ – чернозем глинисто-иллювиальный элювиированный; $АЧ_{ГИ}^{Т}$ – чернозем глинисто-иллювиальный темноязыковатый; $АС_{Т}$ – тёмно-серая; АС – серая.

Установлено, что в среднегумусированных почвах (черноземах, тёмно-серых и серых) происходит уменьшение значений $И_{гумус}$ и содержания гумуса в 1,7-2,2 раза по сравнению с сильногумусированными черноземами (рис. 9, Б, табл. 5). Обратная тенденция отмечена по изменению $И_{фосфор}$ и содержанию подвижного фосфора – в сильногумусированных черноземах их значения были в среднем в 2 раза ниже, чем в среднегумусированных видах почв (рис. 9, В, табл. 5).

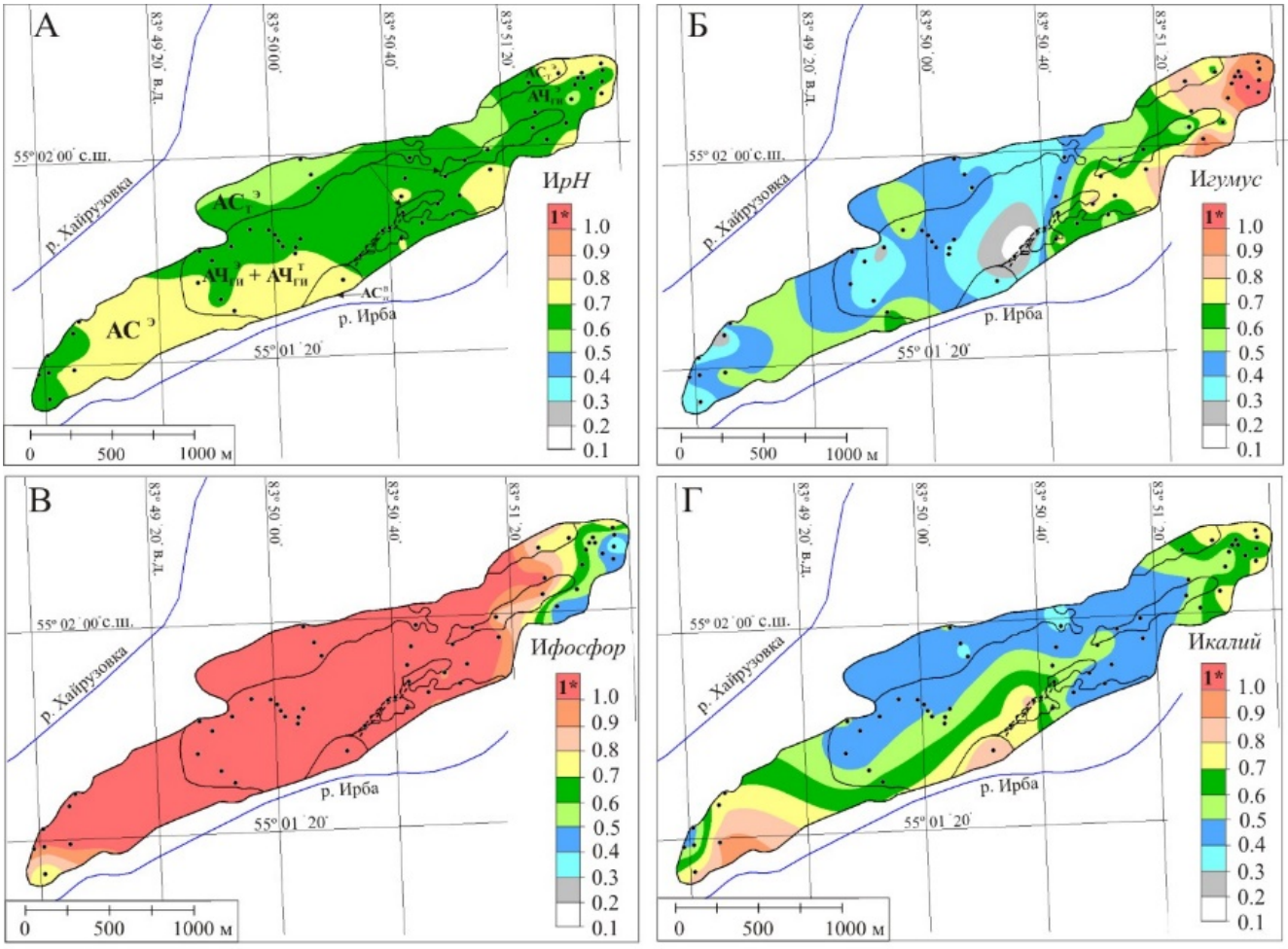


Рис. 9. Карты относительных индексов pH солевого (А), содержания гумуса (Б), подвижного фосфора по Чирикову (В), обменного калия (Г). 1* – фактическое значение выше оптимального уровня.

На карте выделяется значительный по площади ареал почв, в которых $И_{фосфор}$ равен 1,0. Это указывает на то, что фактическое содержание подвижного фосфора выше оптимального уровня (>200 мг/кг). Изменение $И_{калий}$ и содержания обменного калия было неравномерным: в среднегумусированных черноземах и темно-серых почвах их значения снижались в 1,2 раза по сравнению с сильногумусированными черноземами, в остальных случаях различия были недостоверны (рис. 9, Г, табл. 5). В целом содержание обменного калия в почвах было ниже оптимального уровня (<300 мг/кг).

На основе цифровых карт относительных индексов ($И_{pH}$, $И_{гумус}$, $И_{фосфор}$, $И_{калий}$) построена карта индекса и степени окультуренности почв (рис. 10). Несмотря на то, что содержание гумуса в сильногумусированных почвах близко к значению эталонной почвы (8%), а в среднегумусированных почвах – существенно ниже, степень окультуренности почв одинаковая и соответствует среднему уровню. Это связано с более высоким содержанием подвижного фосфора по Чирикову в среднегумусированных почвах. Таким образом, среднегумусированные почвы (черноземы, темно-серые и серые) могут иметь близкую качественную оценку с сильногумусированными черноземами. Согласно полученным данным, различия по запасам надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси на сильно- и среднегумусированных почвах недостоверны (табл. 5).

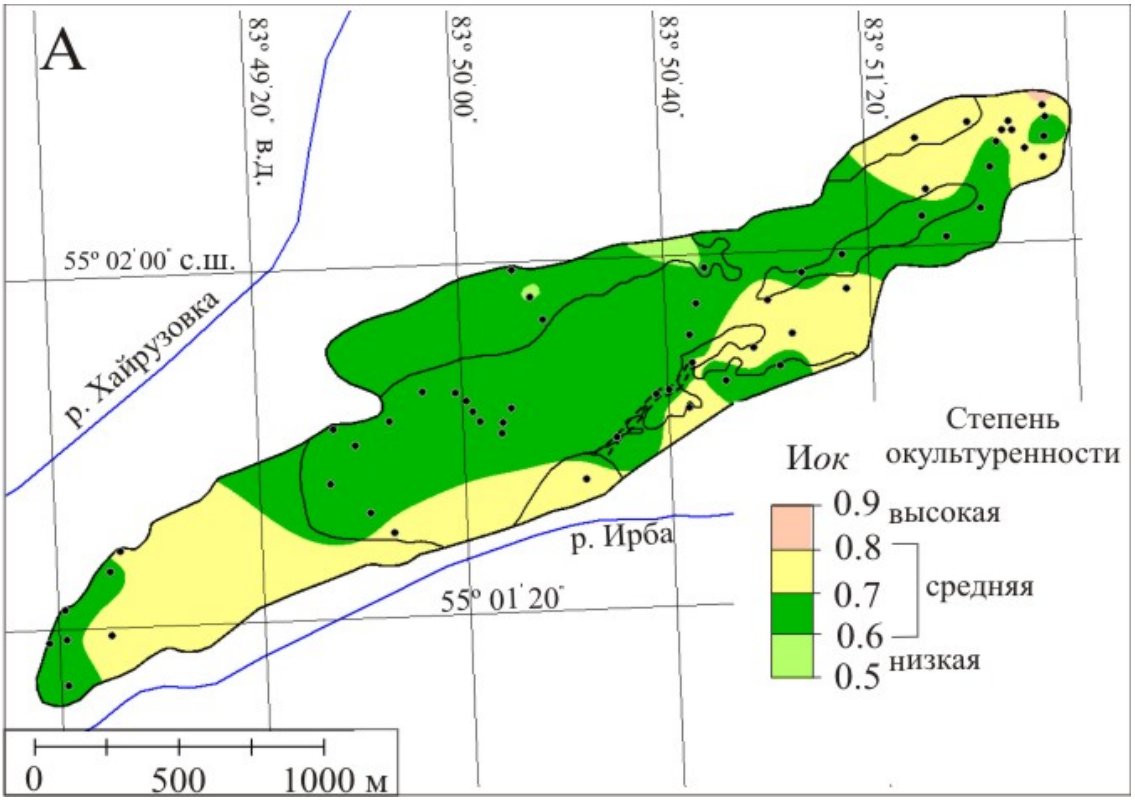


Рис. 10. Карта индекса и степени окультуренности пахотного горизонта почв.

Результаты исследований показали, что по цифровым картам относительных индексов агрохимических свойств и индекса окультуренности почв можно оценить качественные и количественные параметры, а также пригодность для возделывания сельскохозяйственных культур, определить географическое расположение ареалов почв с дефицитом тех или иных элементов питания.

Глава 7. Использование вегетационных индексов для цифрового картографирования урожайности яровой пшеницы и оценка ее изменений в зависимости от свойств пахотного горизонта агропочв (на примере Предсалаирской возвышенной равнины)

Прогнозные оценки урожайности сельскохозяйственных культур, как в научном, так и практическом плане представляют большую ценность, так как позволяют заблаговременно планировать мероприятия по выявлению и устранению факторов, приводящих к снижению урожайности. Методические подходы цифрового картографирования урожайности культур недостаточно проработаны, что обусловливает необходимость углубленного рассмотрения данной проблемы.

На территории исследования распространены следующие почвы: агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный и агротемно-серая. Отбор индивидуальных почвенных проб (n=48) проводили из пахотного горизонта (0-30 см) перед посевом пшеницы. Определение урожайности яровой пшеницы проводили в сентябре в 2-х кратной повторности методом укосов с учетной площади 0,25 м^2. В качестве предикторов урожайности использовали угловые (NDVI, EVI, RVI, CTVI, SAVI) и дистантные (MSAVI2) вегетационные индексы, рассчитанные по снимку Landstat 8 OLI (разрешение 30 м).

В линейных регрессионных моделях вегетационные индексы объяснили от 76 до 86% вариации урожайности яровой пшеницы (рис. 11).

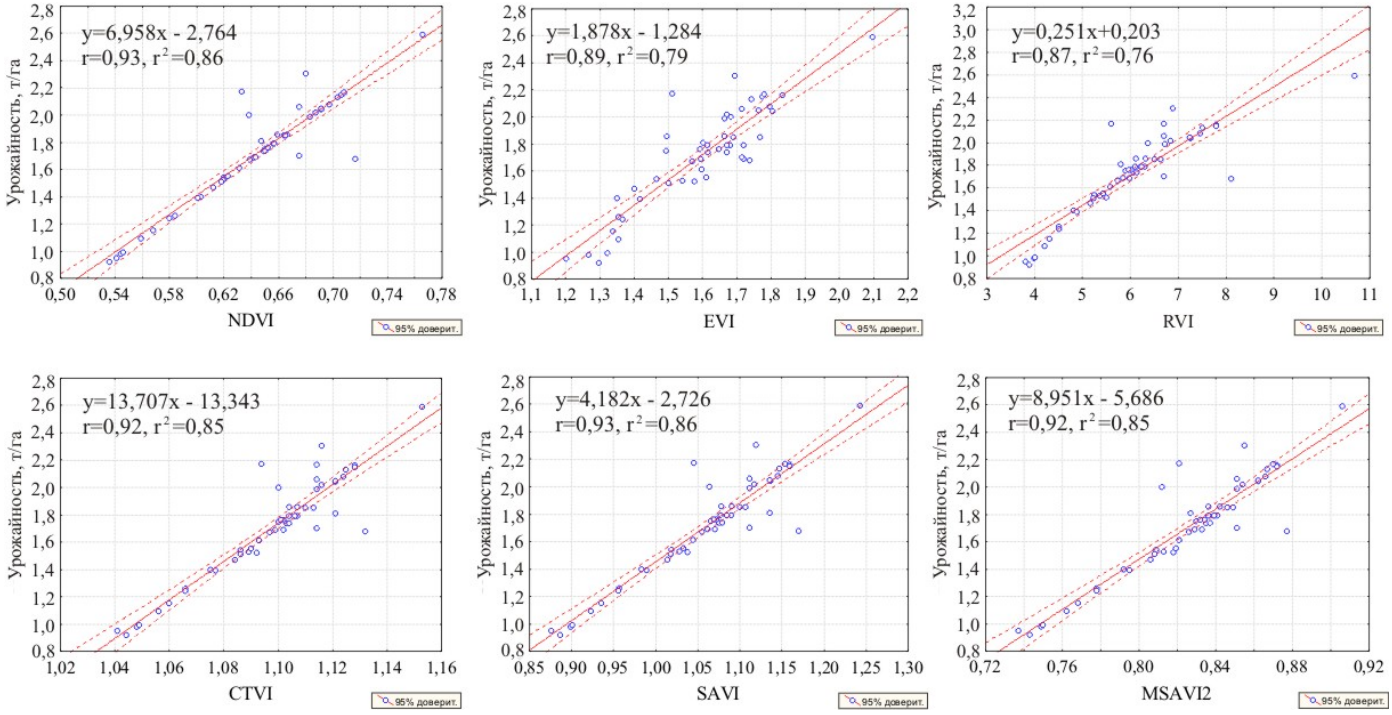


Рис. 11. Регрессионные модели зависимости между урожайностью пшеницы и вегетационными индексами

Модель с NDVI характеризуется лучшими прогностическими свойствами, в связи с более высоким коэффициентом детерминации. Сравнительный визуальный анализ цифровых карт, составленных с использованием полученных линейных моделей, показал, что результаты картографирования урожайности яровой пшеницы с использованием различных индексов практически идентичны (рис. 12). Картографическая модель урожайности яровой пшеницы, составленная на основе вегетационного индекса EVI, демонстрировала в 2 раза завышенные значения по урожайности на участке с разреженным растительным покровом, следовательно, результаты моделирования и картографирования являются неудовлетворительными. Наибольшая урожайность яровой пшеницы (2,6 т/га) наблюдалась на более гумусированном и увлажненном агрочерноземе средней части южного склона, тогда как на менее гумусированных почвах водораздельной территории урожайность яровой пшеницы была относительно ниже (рис. 12, 13 А, Б). В западной части поля урожайность яровой пшеницы была низкой от 0,4 до 0,8 т/га, из-за наличия вредителей с.-х. культур в почве (личинки майского жука в количестве 32 шт./м^2).

В агротемно-серой почве по сравнению с агрочерноземом содержание гумуса в пахотном горизонте было ниже в 1,2 раза, предпосевной влажности – в 1,1, нитратного азота – в 1,4, подвижного фосфора – в 1,6, легкоподвижного фосфора – в 5,1, обменного калия – в 1,4, подвижного цинка – в 1,5 раза, что свидетельствует о более высоком потенциальном плодородии агрочернозема (табл. 6). Однако, несмотря на это, вегетационные индексы посевов и урожайность яровой пшеницы на агрочерноземе статистически значимо не отличались от соответствующих показателей на агротемно-серой почве. По содержанию физической глины, обменных

кальция и магния, подвижных форм меди, марганца и кобальта в почвах, относящихся к различным отделам классификации, статистически значимых отличий средних значений не обнаружено.

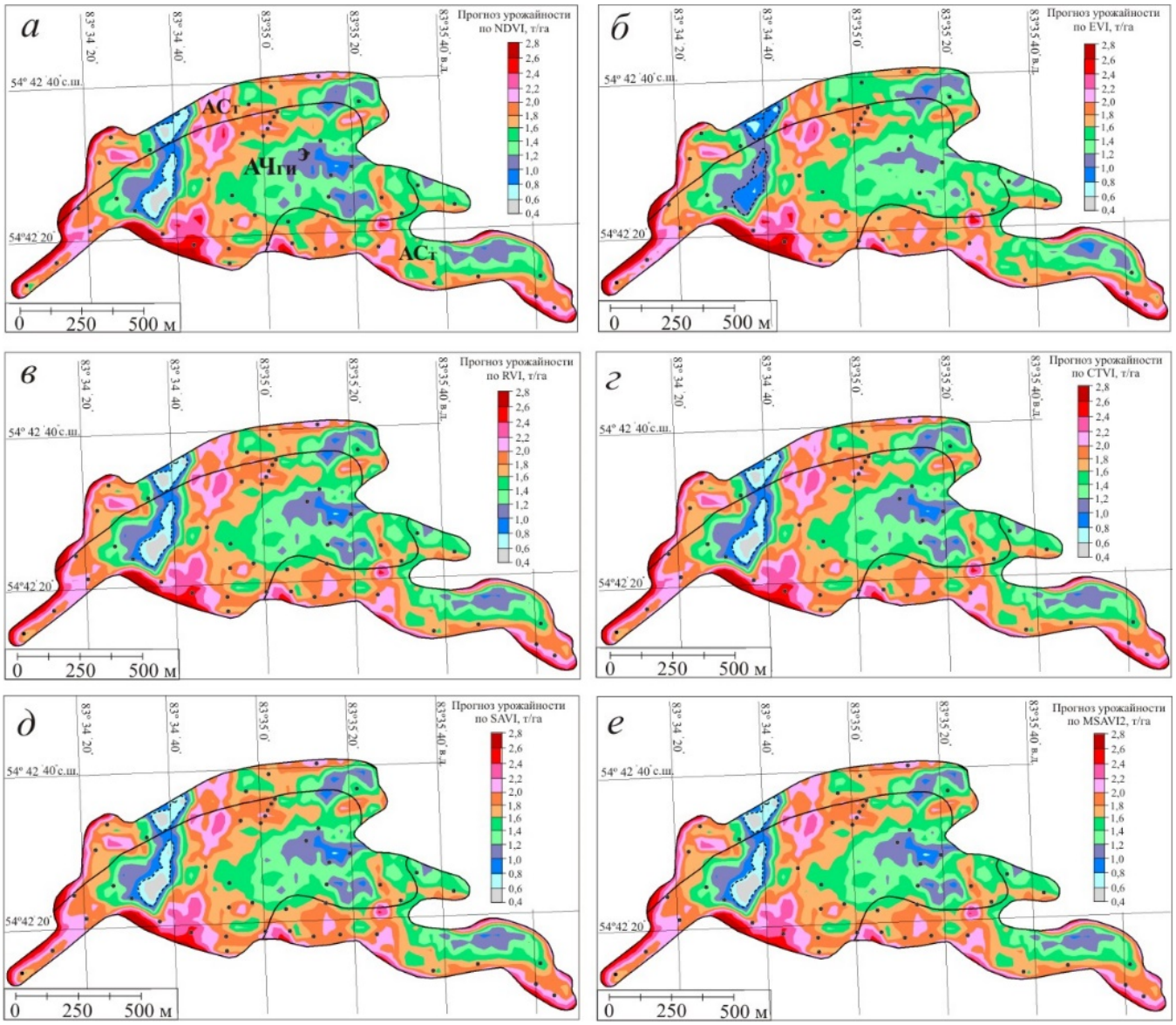


Рис. 12. Карты урожайности яровой пшеницы, составленные с использованием различных вегетационных индексов в качестве предиктора. Почвы: $АЧ_{ГИ}^{Э}$ – агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный; $АС_{Т}$ – агротемно-серая

В почве средней части южного склона наблюдалось большее содержание гумуса, подвижного и легкоподвижного фосфора, обменных кальция и магния (рис. 13), а также зафиксирована нейтральная реакция среды (рис. 13, В). Перечисленные свойства почв, за исключением содержания подвижных форм фосфора, коррелировали с предпосевной влажностью. Таким образом, более увлажненные агрочерноземы в средней части южного склона отличались более высоким плодородием, в поддержании которого немаловажную роль играет влажность почв (усиливает выветривание минералов и растворимость веществ, улучшает доступность питательных элементов растениям).

Таблица 6. Варьирование агрохимических свойств пахотного горизонта почв, вегетационного индекса NDVI и урожайности яровой пшеницы

Показатели	Почвы	
	Агрочернозем (*n*=24)	Агротемно-серая (*n*=24)
Гумус, %	4,4 (3,9; 5,1)	4,1 ± 0,95 **
Влажность, %	23,5 (21,8; 24,5)	21,9 ± 1,8 *
Азот нитратный, мг $N\text{-}NO_3$/кг	5,9 ± 1,8	4,1 ± 1,0 *
Подвижный фосфор, мг P_2O_5/кг	193 (147; 282)	164 ± 40**
Фосфор легкоподв., мг P_2O_5/кг	1,95 (0,57; 3,17)	0,75 (0,44; 1,01) **
Обменный калий, мг K_2O/кг	146 (107; 189)	125 (110; 149) **
Кальций обм., смоль (экв)/кг	15,7 (14,4; 16,8)	14,9 ± 3,5
Магний обм., смоль (экв)/кг	2,3 (1,9; 2,6)	2,0 (1,8; 2,6)
Цинк подв., мг/кг	0,9 (0,67; 1,3)	0,64 (0,52; 0,95) *
Медь подв., мг/кг	0,077 ± 0,022	0,074 ± 0,028
Марганец подв., мг/кг	25,04 ± 4,14	22,68 ± 3,97
Кобальт подв., мг/кг	0,02 (0; 0,03)	0,025 (0; 0,035)
Физическая глина, %	38,5 (37,7; 39,9)	40,3 ± 3,7
NDVI	0,642 ± 0,06	0,644 ± 0,04
Урожайность, т/га	1,69 ± 0,41	1,72 ± 0,32

Примечание: для данных с нормальным распределением приведены среднее и стандартное отклонение (M±*s*), с анормальным – медиана и квартили (Q_1; Q_3); * – значения показателей отличаются ($p<0,01$) от соответствующих величин в агрочерноземе, ** – отличия значимы при $p<0,05$.

Установлена заметная положительная корреляционная связь урожайности яровой пшеницы и NDVI с предпосевной влажностью (r=0,52; r=0,57) и содержанием обменного калия (r_s=0,58; r_s=0,61), умеренная связь с гумусом (r=0,35; r=0,38), легкоподвижным фосфором (r_s=0,32; r_s=0,35) и подвижным цинком (r_s=0,42; r_s=0,48).

Не обнаружены значимые корреляции показателя NDVI и урожайности яровой пшеницы с содержанием нитратного азота, подвижного фосфора, физической глины, обменных кальция и магния, подвижных форм меди, марганца и кобальта, показателем pH.

Установлено, что низкое содержание макро- и микроэлементов, недостаточная предпосевная влагообеспеченность почвы, а также вредители культур являлись причинами неравномерной урожайности яровой пшеницы. Недостаточная предпосевная влажность почв являлась лимитирующим фактором в формировании урожая яровой пшеницы и не позволила агрохимическим свойствам почв произвести значительный эффект в увеличении урожайности.

Выявлено сравнительно более высокое содержание подвижных форм макро- и микроэлементов в почвах с более высокими значениями предпосевной влажности (рис. 14, рис. 15).

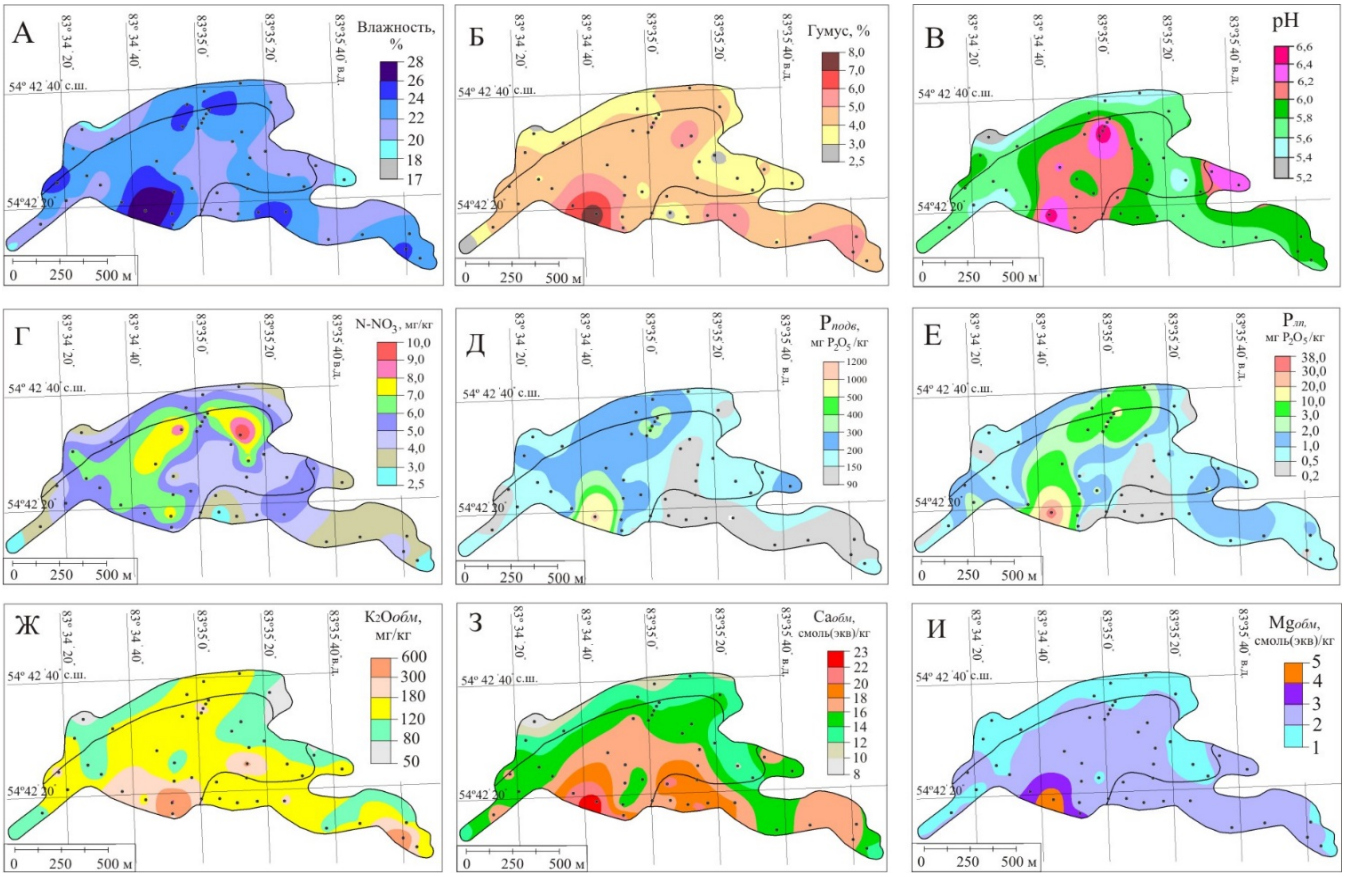


Рис. 13. Карты содержания в пахотном горизонте почв: А – предпосевной влажности; Б – гумуса; В – pH; Г – нитратного азота; Д – подвижного фосфора; Е – легкоподвижного фосфора; Ж – обменного калия; З – обменного кальция; И – обменного магния

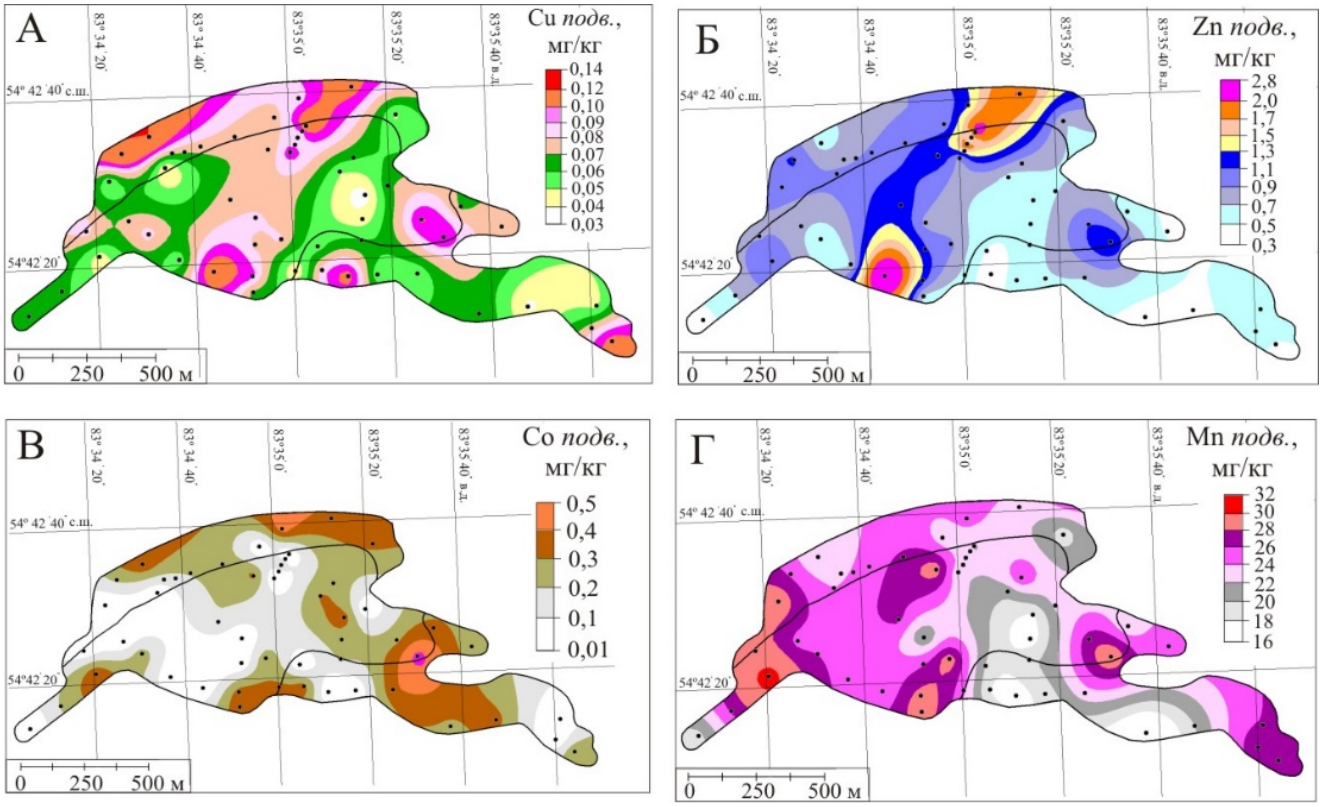


Рис. 14. Карты содержания в пахотном горизонте почв подвижных форм: А – меди; Б – цинка; В – кобальта; Г – марганца

Таким образом, результаты исследований показали, что применение вегетационных индексов в качестве косвенных индикаторов урожайности яровой пшеницы и рассчитанные на их основе цифровые карты позволяют оценивать неоднородность урожайности яровой пшеницы, а сопоставление ее с картами агрохимических свойств почв позволяет выявить причины неравномерной урожайности.

Глава 8. Использование почвенно-геоморфологической базы данных для изучения пространственной изменчивости содержания гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв и почвообразующей породе (на примере Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции)

На основе архивных почвенных данных Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции создана векторная карта, состоящая из 263 геопривязанных точечных объектов, которые показывают географическое положение почвенных разрезов (рис. 15). Геопривязанные точечные объекты были связаны с атрибутивной информацией, содержащейся в базе данных, которая представлена, как географической информацией (координаты, область район, хозяйство), так и описанием различных почвенных и геоморфологических параметров. На следующем этапе с использованием цифровой модели высот SRTM v.3 были построены карты морфометрических параметров рельефа (МПР) (рис. 16). Значения МПР под каждым точечным объектом экспортировали с различных карт в созданную базу данных для дальнейшего анализа и составления диаграмм.

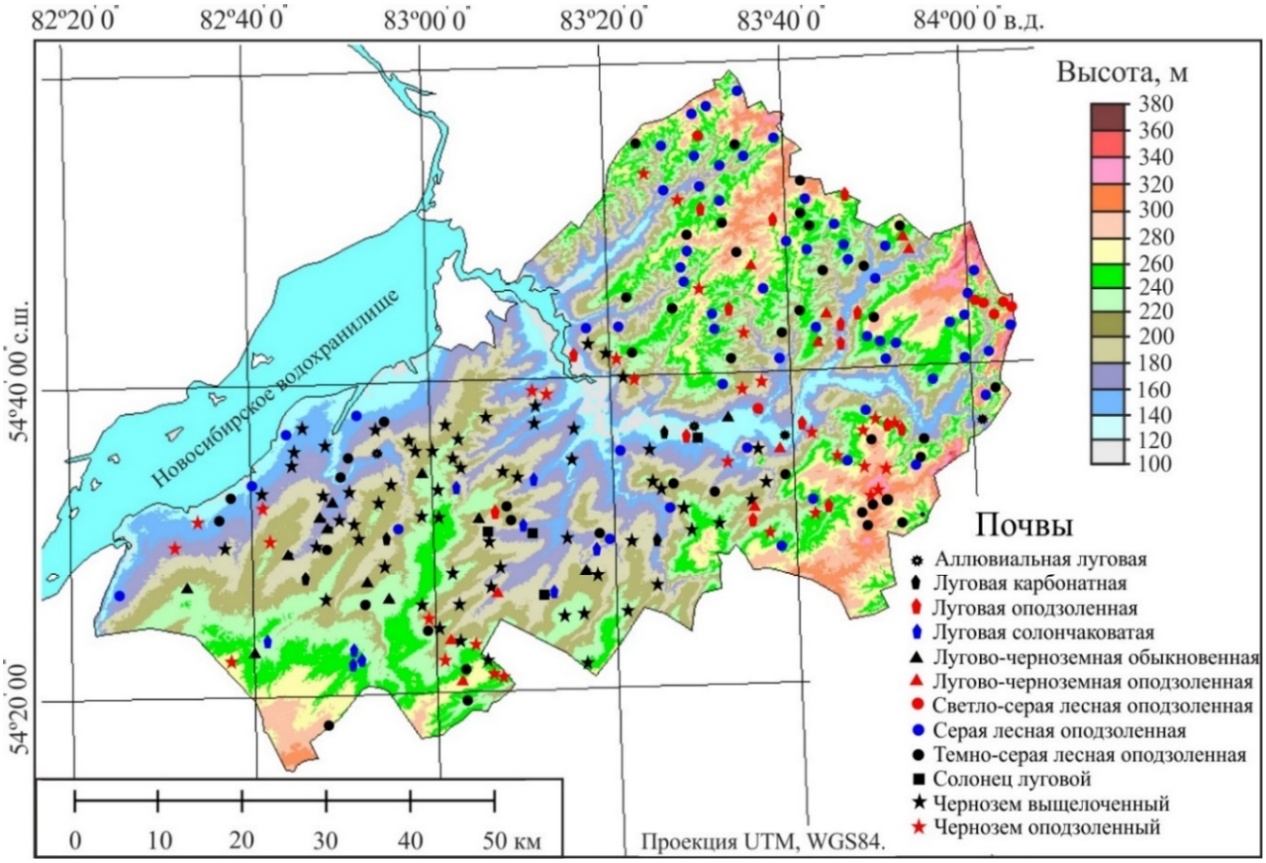


Рис. 15. Карта территории исследования и схема расположения почвенных разрезов (*n*=263)

Анализ карты крутизны склонов показывает, что наибольшие значения характерны для северной и восточной части изучаемой территории, что связано с увеличением расчлененности рельефа (рис. 16, А). Характеристика склонов по крутизне представлена на карте по И.Д. Брауде: 0-1 – слабопологие; 1-2 – пологие; 2-5 – покатые; 5-9 – покато-крутые; 9-20 – крутые. Негативные последствия для почв от воздействия эрозии характерны для склонов с крутизной от 5 градусов и выше. Чем выше значение крутизны склона, тем больший ущерб будет причинен почвам в результате их размыва. Анализ диаграмм показывает, что почвы, занимающие слабопологие склоны отличаются более высоким содержанием гумуса в верхнем горизонте почв по сравнению с почвами, залегающими на покато-крутых склонах (рис. 17, А, I). Аналогичная закономерность характерна для содержания ила в почвах (рис. 17, А, III). Отличий по содержанию физической глины в верхнем горизонте почв, занимающих геоморфологические позиции (ГП) с разным диапазоном крутизны, не наблюдается (рис. 17, А, II). Матрица корреляций показала, что тесной зависимости между крутизной склонов и изучаемыми почвенными характеристиками не установлено.

Наибольшее влияние на потери почвы в результате эрозии оказывает длина и крутизна склона, совокупное выражение которых представлено в таком параметре, как LS-factor (Slope Length and Steepness factor). S-фактор оценивает влияние крутизны склона, а L-фактор определяет влияние длины склона на развитие эрозионных процессов. Анализ карты показывает, что наибольшие значения LS-factor характерны для северной и восточной части изучаемой территории, что связано с увеличением расчлененности рельефа и крутизны склонов, а также наличием длинных склонов (рис. 16, Б). Градации риска развития эрозии по индексу LS-factor (интерпретация автора): 0-0,4 – риск отсутствует; 0,4-0,8 – слабый; 0,8-1,5 – средний; 1,5-2 – высокий; 2-10 – очень высокий риск. Анализ диаграмм показывает, что отличий по содержанию гумуса, физической глины и ила между выборками верхнего горизонта почв, занимающих ГП с разным диапазоном LS-factor, не наблюдается (рис. 17, Б, I-III). Корреляции между изучаемыми почвенными характеристиками и LS-factor слабые.

Индекс мощности потока (Stream Power Index, SPI) рассчитывается на основе данных о площади удельного водосбора и крутизне склонов [Moore et all., 1991]. Чем выше значения SPI, тем выше вероятность развития эрозии. Анализ карты показывает, что наибольшие значения SPI характерны для северной и восточной части изучаемой территории, что связано с увеличением расчлененности рельефа (рис. 16, В). Анализ диаграмм показывает, что отличий между выборками почв по содержанию гумуса, физической глины и ила с различным диапазоном SPI не наблюдается (рис. 17, В, I-III).

Топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index, TWI) разработан для характеристики гидрологических процессов, протекающих в различных сферах Земли [Beven, Kirkby, 1979]. В почвоведении TWI можно использовать для характеристики ГП, в которых почвы отличаются друг от друга водным режимом. Следует отметить, что этот индекс учитывает особенности рельефа как на повышенных, так и пониженных участках, т.е. если имеются понижения на возвышенных участках, то это отражается в увеличении значений индекса TWI относительно прилегающих возвышенных участков.

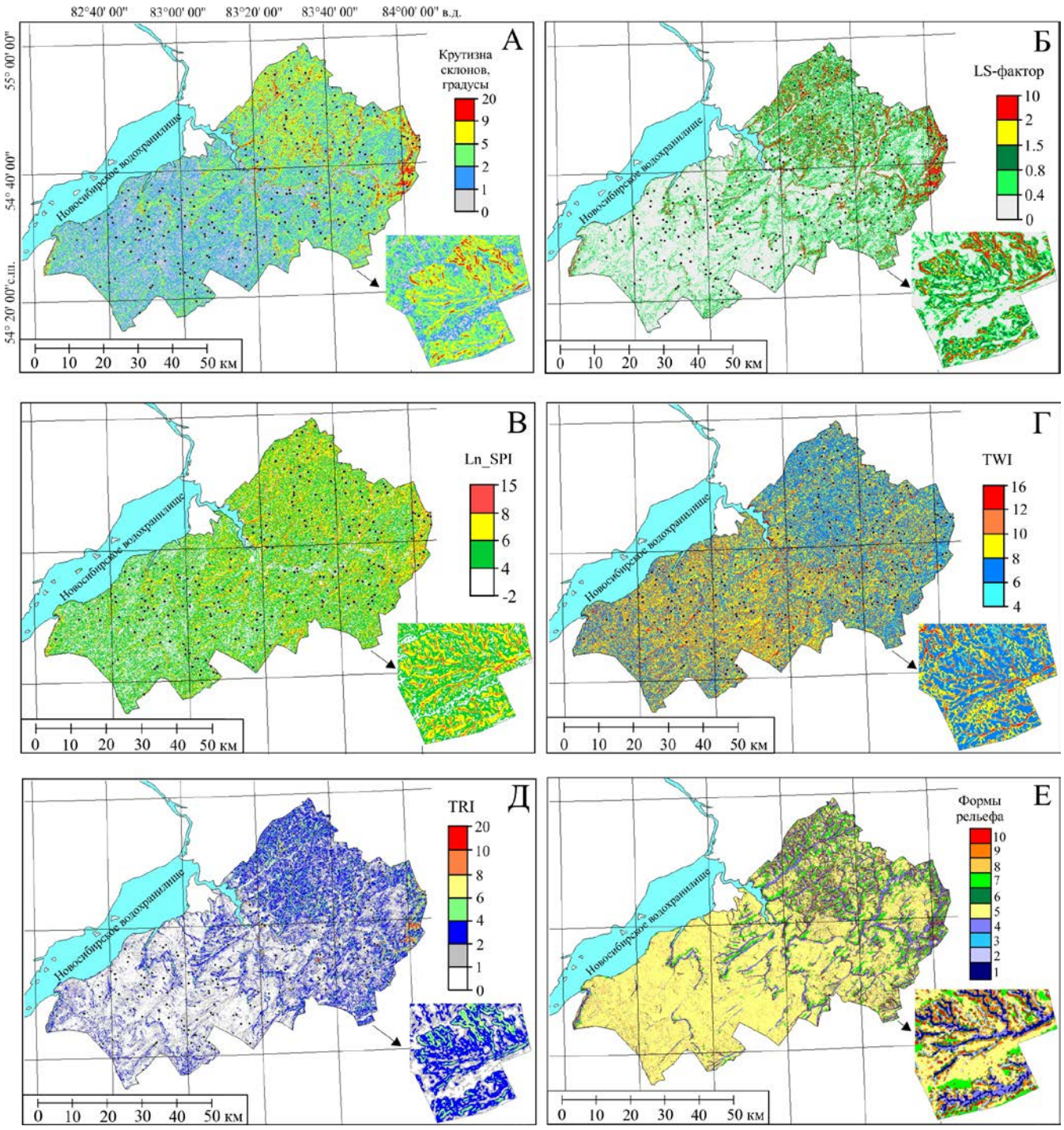


Рис. 16. Карты МПР: А – крутизна склонов; Б – фактор риска развития эрозии (LS-фактор). В – индекс мощности потока (SPI, логарифмированные значения); Г – топографический индекс влажности (TWI); Д – индекс расчлененности рельефа (TRI). Е – формы рельефа. Условные обозначения для рис. 16 Е: 1 – каньоны, глубоко врезанные ба́лки, русла рек, ручьев; 2 – дренажная сеть средней части склонов (неглубоко врезанные ба́лки, неглубокие долины); 3 – дренажные впадины верхней части склонов, истоки рек (верховье рек, временных водотоков, балок); 4 – U-образные долины, долины рек, ручьев, временных водотоков; 5 – равнины; 6 – открытые крутые склоны (>5^0); 7 – привершинные склоны (пологие и покатые), плоскогорья; 8 – локальные гребни холмов или хребтов, холмы в долинах; 9 – вершины холмов средней части склонов, небольшие холмы на равнинах; 10 – горные вершины, высокие гребни холмов

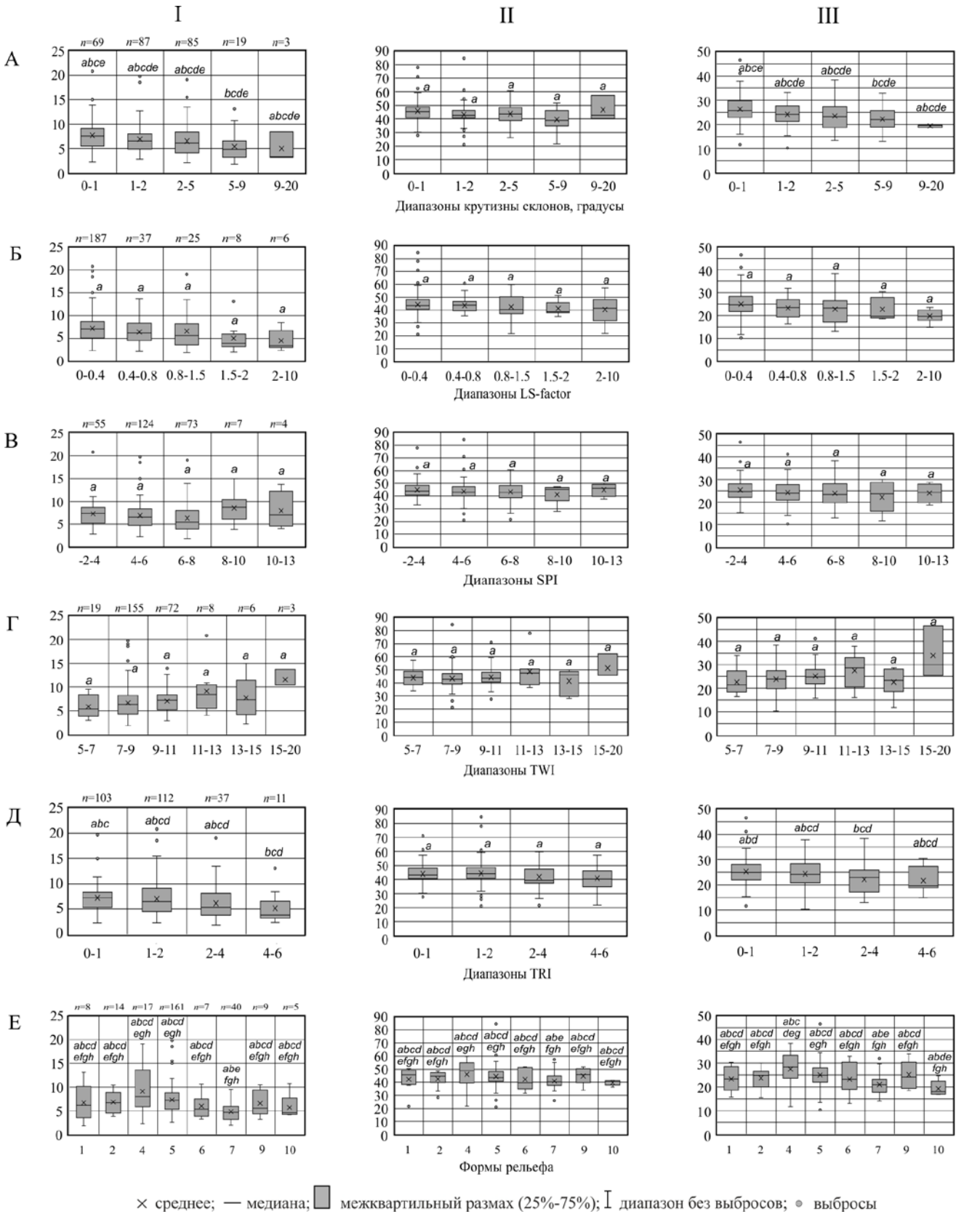


Рис. 17. Варьирование (%) содержания гумуса (I), физической глины (II) и ила (III) в верхнем горизонте почв, занимающих геоморфологические позиции с разными диапазонами морфометрических параметров и формами рельефа (обозначение форм рельефа приведено на рис. 16). Примечание: одинаковые буквы над диаграммами размаха обозначают отсутствие достоверных различий между выборками (p<0,05) по результатам сравнения методом Краскала-Уоллиса с поправкой Хольма на множественные сравнения

Анализ карты показывает, что наибольшие значения TWI наблюдаются на равнинной юго-западной части изучаемой территории, рельеф которой способствует замедлению поверхностного и внутрипочвенного стока (рис. 16, Г). Различий по содержанию гумуса, физической глины и ила между выборками почв, занимающих ГП с разным диапазоном TWI не обнаружено (рис. 17, Г, I-III). Почвы полугидроморфного ряда (луговые и лугово-черноземные) занимают пониженные ГП с высокими значениями TWI, в которых содержание гумуса колеблется от 10 до 20%. Однако, в таких же ГП (с высокими значениями TWI) встречаются почвы с меньшим содержанием гумуса (от 5 до 9 %), поэтому корреляция TWI с содержанием гумуса слабая (r=0,18). Корреляция TWI с содержанием физической глины не обнаружена, а с содержанием ила – корреляция слабая.

Индекс расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index, TRI) характеризует вертикальную неоднородность рельефа. Высокие значения TRI свидетельствуют о повышенной локальной расчлененности рельефа. Характеристика рельефа по TRI (интерпретация автора): 0-1 – нерасчлененный; 1-2 – слаборасчлененный; 2-4 – среднерасчлененный; 4-6 – значительно расчлененный; более 6 – сильнорасчлененный рельеф (рис. 17, Д). Анализ карты показывает, что наибольшие значения TRI наблюдаются в северо-восточной окраине изучаемой территории, для которой характерен преимущественно среднерасчлененный рельеф. Наименьшие значения TRI отмечены для юго-западной части территории, для которой в большей степени характерен нерасчлененный и слаборасчлененный рельеф. Анализ диаграмм показывает, что почвы, занимающие нерасчлененный рельеф, отличаются более высоким содержанием гумуса по сравнению с почвами на значительно расчлененном рельефе (рис. 16, Д, I). Содержание ила в почвах, занимающих среднерасчлененный рельеф, было меньше по сравнению с почвами на нерасчлененном рельефе (рис. 17, Д, III). В остальных случаях различия между изучаемыми свойствами почв в выборках недостоверны (рис. 17, Д, I-III).

Индекс топографического положения (Topographic Position Index, TPI) представляет собой разницу между средней высотой области ячеек локальной сетки и средней высотой ячеек в окружающей окрестности. Значения TPI больше нуля показывают самые высокие ГП, например, это могут быть вершины гор, холмов, сопок. Отрицательные значения TPI представляют собой более низкие ГП, например, это могут быть плоские низменности, долины рек, лощины и балки, а также горы или возвышенности с плоскими вершинами. ГП со значениями TPI близкими к нулю представляют собой либо плоскую поверхность, либо пологие склоны, с незначительной крутизной. Значения TPI являются основой для классификации форм рельефа [Guisan, Weiss, Weiss, 1999; Weiss, 2000]. Анализ карты, составленной на основе группировки значений TPI, показывает, что в юго-западной части территории преобладает равнинный рельеф, а для северо-восточной части характерны преимущественно приподнятые формы рельефа, изрезанные долинами рек и ба́лками (рис. 16, Е). Анализ диаграмм показывает, что почвы, занимающие долины рек (4) и равнины (5), по сравнению с почвами привершинных склонов (7) и высоких гребней холмов (10), характеризуются более высоким содержанием гумуса, физической глины и ила (рис. 17, Е, I-III, рис. 16). Таким образом, в почвах пониженных форм рельефа (долины, равнины) происходит накопление гумуса, физической глины и ила вследствие действия экзогенных процессов (поступление почвенного материала под действием силы гравитации с вышележащих ГП) и сложившейся гидрологической

обстановки (выветривание первичных минералов и минерализация растительных остатков в умеренно влажных условиях протекают быстрее).

Данные о свойствах почв из базы данных использовались для составления цифровых карт содержания гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв и почвообразующей породе методом ординарного кригинга (рис. 18). Установлено, что с северо-востока на юго-запад исследуемой территории содержание гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв существенно увеличивается (рис. 18, А, Б, В).

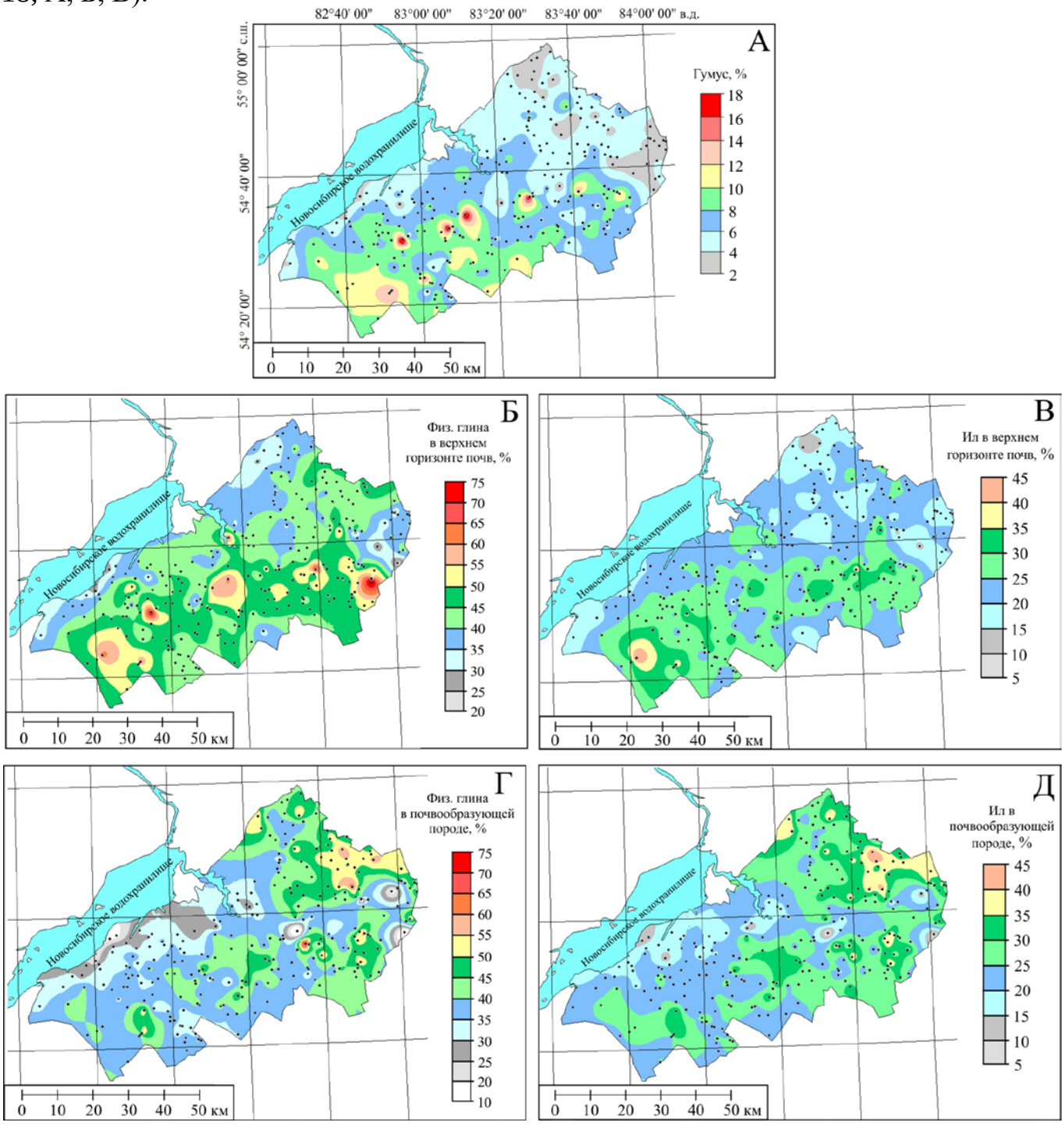


Рис. 18. Карты содержания: А – гумуса в верхнем горизонте почв; Б – физической глины верхнем горизонте почв; В – ила в верхнем горизонте почв; Г – физической глины в почвообразующей породе; Д – ила в почвообразующей породе.

Аналогичный тренд выявлен и для топографического индекса влажности (TWI), значения которого также увеличиваются с северо-востока на юго-запад (рис. 16, Г). Однако корреляции между TWI и параметрами почв несущественные.

Необходимо отметить, что значительно более высокие коэффициенты корреляции почвенных свойств с МПР наблюдаются при изучении почв небольших по площади территорий, например, в пределах водораздельных территорий или склонов [Шарый, Пинский, 2013; Гопп и др., 2017]. Кроме этого, согласно исследованиям [Florinsky, Kuryakova, 2000], важное значение имеет оптимальный размер сетки цифровой модели высот, правильный подбор которой позволяет увеличить коэффициенты корреляции. В настоящем исследовании сделана попытка увеличения (до 20х20 м) и уменьшения (до 60х60 и 100х100 м) разрешения цифровой модели высот, имеющей исходное разрешение 35х30м. Результаты корреляционного анализа показали, что коэффициенты корреляции между МПР, рассчитанными по ЦМВ с более высоким и более низким разрешением, и изучаемыми свойствами почв не увеличились (табл. 7).

Таблица 7. Коэффициенты корреляции Спирмена между почвенными свойствами и морфометрическими параметрами рельефа, рассчитанными по цифровой модели высот (ЦМВ) с разным разрешением (n=263, p<0,05)

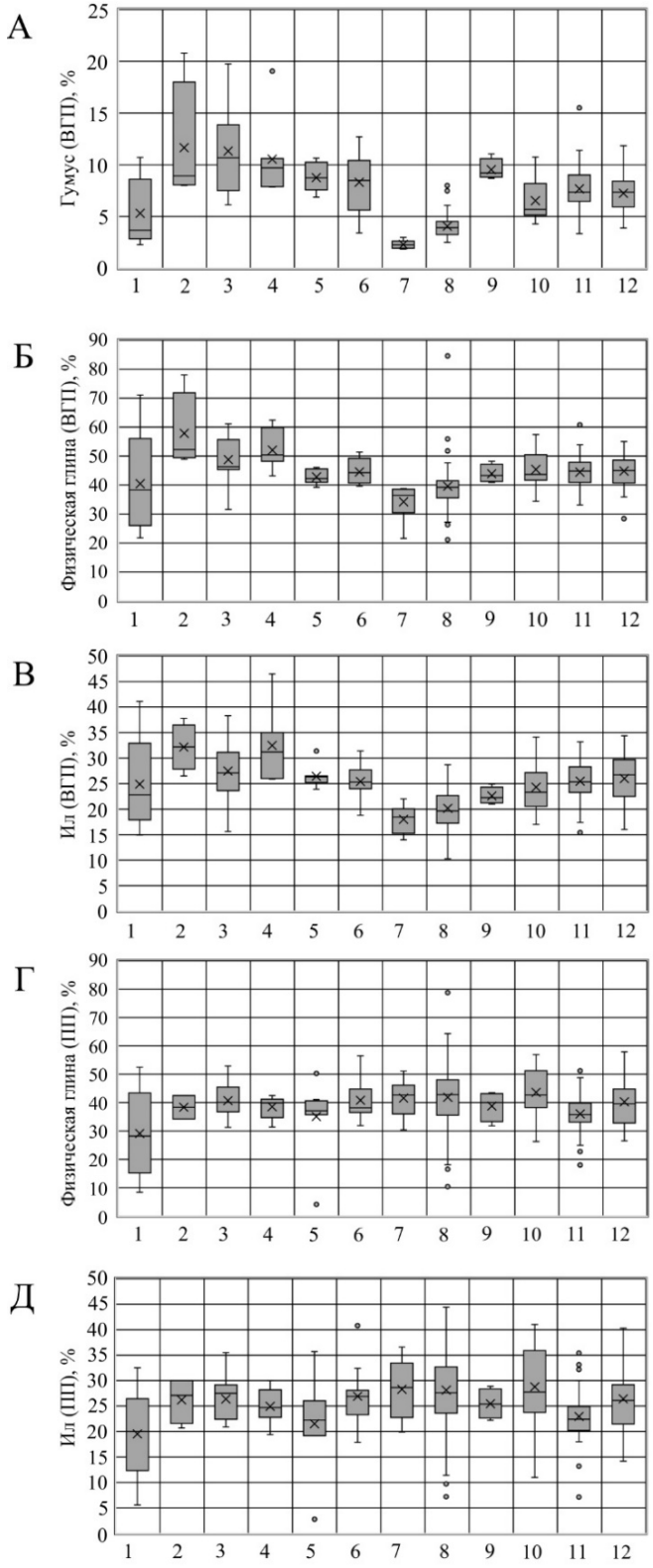
Параметр	Гумус	Физическая глина (ВГП)	Ил (ВГП)	Физическая глина (ПП)	Ил (ПП)
ЦМВ с разрешением 20×20 м					
Высота	-0,24	x	-0,18	0,42	0,41
Крутизна	-0,13	x	x	x	x
LS-factor	x	x	x	x	x
SPI	x	x	x	x	x
TWI	0,14	x	x	x	x
TRI	-0,22	-0,12	-0,18	0,14	0,15
TPI	x	x	x	x	x
Формы рельефа	0,25	-0,16	-0,21	0,15	0,18
ЦМВ с разрешением 60×60 м					
Высота	-0,25	x	-0,18	0,42	0,41
Крутизна	-0,26	-0,18	-0,28	0,13	0,15
LS-factor	-0,22	-0,15	-0,24	x	0,12
SPI	x	x	x	x	x
TWI	0,25	0,16	0,29	-0,12	-0,13
TRI	-0,20	x	-0,21	0,22	0,23
TPI	-0,31	-0,20	-0,27	0,21	0,20
Формы рельефа	-0,28	-0,23	-0,26	0,13	0,14
ЦМВ с разрешением 100×100 м					
Высота	-0,25	-0,25	-0,18	0,43	0,42
Крутизна	-0,29	-0,21	-0,32	0,19	0,19
LS-factor	-0,23	-0,18	-0,28	0,14	0,14
SPI	x	x	x	x	x
TWI	0,33	0,22	0,34	-0,24	-0,27
TRI	-0,23	-0,16	-0,25	0,22	0,23
TPI	-0,32	-0,23	-0,27	0,23	0,24
Формы рельефа	-0,23	-0,20	-0,24	0,18	0,19

Данная особенность, по всей видимости, связана со следующими неучтенными факторами: 1) неравномерным количеством поступавших растительных остатков в почву в течении всего периода почвообразования; 2) неравномерным перераспределением почвенного материала по поверхности Земли в результате протекающих эрозионных процессов; 3) внесением органических удобрений; 4) наличием стратификации почвообразующих пород и др..

При сопоставлении и анализе карт содержания физической глины и ила в верхнем горизонте почв и почвообразующей породе установлена обратная тенденция в изменении изучаемых свойств почв, то есть существенно увеличивается содержание физической глины и ила в почвообразующей породе с юго-запада на северо-восток исследуемой территории (рис. 18, Б, В, Г, Д). Коэффициенты корреляций между изучаемыми физическими свойствами верхнего горизонта почв и почвообразующих пород несущественны.

Содержание гумуса в верхнем горизонте почв варьировало в пределах от 2 до 20% (рис. 19, А). Наименьшее содержание гумуса характерно для светло-серых лесных почв, среднее – для черноземов, наибольшее – для разных родов луговых почв (обыкновенных, солончаковатых, карбонатных и оподзоленных), которые формируются в геоморфологических позициях с высокими значениями топографического индекса влажности. В светло-серых и серых лесных почвах содержание гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте существенно отличалось более низкими значениями по сравнению с другими почвами (рис. 19, А, Б, В). Обратная закономерность выявлена для серых и темно-серых лесных почв по содержанию физической глины и ила в почвообразующей породе, которые отличались более высокими значениями по сравнению с черноземами выщелоченными. В остальных почвах различия между изучаемыми свойствами почвообразующих пород в выборках недостоверны (рис. 19, Г, Д).

Результаты исследований показали, что морфометрические параметры рельефа, рассчитанные по цифровым моделям высот, позволили подробно охарактеризовать геоморфологические особенности, в которых формируются почвы западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции. Установлено, что с северо-востока на юго-запад исследуемой территории содержание гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв существенно увеличивается. Аналогичный тренд выявлен и для топографического индекса влажности. Выявленные тренды заметны только при визуальном сравнении карт свойств верхнего горизонта почв и параметров рельефа, тогда как корреляционный анализ не показывает наличие существенной зависимости между изученными параметрами. Для содержания физической глины и ила в почвообразующей породе установлены противоположные тренды, то есть отмечено увеличение содержания изучаемых показателей с юго-запада на северо-восток, что, по всей видимости, обусловлено стратификацией почвообразующих пород, сформированной в период формирования осадочных пород в четвертичное время. Необходимо отметить, что существенные корреляции между МПР и содержанием гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв и почвообразующей породе не выявлены.



Почвы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	-	x	x	x	x	0.01	0.01	x	x	x	x
3	x	x	-	x	x	x	0.01	0.01	x	0.01	x	0.01
4	x	x	x	-	x	x	0.01	0.01	x	x	x	x
5	x	x	x	x	-	x	0.01	0.01	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	-	0.01	0.01	x	x	x	x
7	x	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	x	0.01	0.01	0.01	0.01
8	x	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	x	-	0.01	0.01	0.01	0.01
9	x	x	x	x	x	x	0.01	0.01	-	x	x	x
10	x	x	0.01	x	x	x	0.01	0.01	x	-	x	x
11	x	x	x	x	x	x	0.01	0.01	x	x	-	x
12	x	x	0.01	x	x	x	0.01	0.01	x	x	x	-

Почвы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	-	x	x	x	x	0.01	0.01	x	x	x	x
3	x	x	-	x	x	x	0.01	0.01	x	x	x	x
4	x	x	x	-	x		0.01	0.01	x	x	x	x
5	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	-	x	x	0.01	x	x	x	x
7	x	0.01	0.01	0.01	x	x	-	x	x	0.01	0.03	0.03
8	x	0.01	0.01	0.01	x	0.01	x	-	x	0.01	0.01	0.01
9	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x
10	x	x	x	x	x	x	0.01	0.01	x	-	x	x
11	x	x	x	x	x	x	0.03	0.01	x	x	-	x
12	x	x	x	x	x	x	0.03	0.01	x	x	x	-

Почвы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	-	x	x	x	x	0.01	0.01	x	x	x	x
3	x	x	-	x	x	x	0.01	0.01	x	x	x	x
4	x	x	x	-	x	x	0.01	0.01	x	x	x	x
5	x	x	x	x	-	x	x	0.01	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x
7	x	0.01	0.01	0.01	x	x	-	x	x	x	0.01	0.01
8	x	0.01	0.01	0.01	0.01	x	x	-	x	0.01	0.01	0.01
9	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x
10	x	x	x	x	x	x	x	0.01	x	-	x	x
11	x	x	x	x	x	x	0.01	0.01	x	x	-	x
12	x	x	x	x	x	x	0.01	0.01	x	x	x	-

Почвы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x
7	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x
8	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	0.01	x
9	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x
10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	0.01	x
11	x	x	x	x	x	x	x	0.01	x	0.01	-	x
12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-

Почвы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x
7	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x
8	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	0.01	x
9	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x
10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	0.01	x
11	x	x	x	x	x	x	x	0.01	x	0.01	-	x
12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-

Рис. 19. Варьирование содержания гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв (ВГП) и почвообразующей породе (ПП). Обозначения почв: 1 – аллювиальная луговая (*n*=6); 2 – луговая карбонатная (*n*=5); 3 – луговая оподзоленная (*n*=16); 4 – луговая солончаковатая (*n*=7); 5 – лугово-черноземная обыкновенная (*n*=8); 6 – лугово-черноземная оподзоленная (*n*=11); 7 – светло-серая лесная оподзоленная (*n*=7); 8 – серая лесная оподзоленная (*n*=57); 9 – солонец луговой (*n*=6); 10 – темно-серая лесная оподзоленная (*n*=43); 11 – чернозем выщелоченный (*n*=61); 12 – чернозем оподзоленный (*n*=36). В таблице статистических сравнений (расположены справа) указан уровень значимости, при котором отличия между выборками значимы (тест Краскала-Уоллиса с поправкой Хольма), крестиком обозначены не значимые отличия.

Данная особенность может быть связана с наличием неучтенных факторов, которые вносят больший вклад в дисперсию зависимых признаков, например, это может быть связано с количеством поступавших растительных остатков в почву в течении всего периода почвообразования, неравномерным перераспределением почвенного материала по поверхности Земли в результате протекающих эрозионных процессов, внесением органических удобрений, наличием стратификации почвообразующих пород и др. Кроме этого, необходимо учитывать, что большое влияние на результаты исследований оказывает разрешение цифровой модели высот, каждый элемент которой представляет собой среднее интерполированное значение высоты на участке определенного размера, тогда как значения почвенных свойств характерны для почв в точках пробоотбора, то есть это не среднее значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апробирование методики составления почвенной карты показало, что совокупность предикторов, выявляемых по данным дистанционного зондирования Земли, позволяет идентифицировать, прежде всего, пространственные границы таксономических единиц почв, а не их классификационную принадлежность, так как предикторы строго не приурочены к тем или иным почвенным таксонам. Следовательно, для каждого картографируемого участка должны быть установлены предикторы, присущие только для почв изучаемой территории, ввиду не строго определенного их соответствия классификационным единицам почв.

Обобщение материала, полученного при проведении разномасштабного (крупного, среднего и мелкого) почвенного картографирования на различных экспериментальных участках юго-востока Западной Сибири показало, что важное значение при установлении зависимости между свойствами почв и предикторами имеет охват территории исследования – при его увеличении, как правило, коэффициенты корреляции между изучаемыми параметрами почв и предикторами снижаются. Это связано с тем, что вариабельность почвенных свойств обусловлена сочетанием факторов, которые при увеличении охвата территории исследования изменяются как в качественном, так и количественном выражении, при этом параметры предикторов, рассчитываемые по ДДЗЗ, строгой приуроченности к определенным значениям свойств почв не имеют.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Усовершенствованный метод цифрового картографирования с использованием данных дистанционного зондирования Земли позволяет выделять ареалы почв с определенным сочетанием признаков из разных тематических карт, параметры которых соответствуют заданным экспертом условиям. Установлено, что пространственная дифференциация почв Джулукульской котловины на уровне типа и подтипа связана с формами рельефа, запасами надземной фитомассы, увлажненностью, породным и гранулометрическим составом почвообразующих пород, наличием мерзлоты.

2. Выявлена информативность морфометрических параметров рельефа, рассчитанных по цифровой модели высот, для прогнозного картографирования

пространственной изменчивости свойств пахотного горизонта почв склона. Эрозионные процессы и различия в гидротермических условиях (влажности, освещенности) на склонах, инициируемые морфометрическими параметрами рельефа, совместно с антропогенной нагрузкой (вспашкой) оказывают существенное влияние на пространственную изменчивость почвенных свойств. Анализ взаимосвязей между свойствами почв выявил наличие сопряженной зависимости между отдельными показателями, что говорит об их тесном взаимодействии в процессе почвообразования.

3. Выявлена информативность показателя NDVI для прогнозного картографирования свойств пахотного горизонта почв, расположенных на первой (280-310 м) и второй (240-280 м) высотных ступенях. Для небольших ложбин стока, фактическая ширина которых меньше, чем разрешение снимка, показатель NDVI неинформативен для диагностики и картографирования свойств почв. Разработанная методика картографирования позволила установить закономерности пространственной изменчивости физических и химических свойств почв.

4. Сравнительный анализ картографических моделей урожайности яровой пшеницы, составленных с использованием вегетационных индексов (NDVI, RVI, CTVI, SAVI, MSAVI2), позволил установить, что построенные модели урожайности практически идентичны. На основе сопоставления построенных моделей урожайности с картографическими моделями физических и химических свойств почв, установлено, что причинами неравномерной урожайности культур в агроценозе являются варьирование содержания макро- и микроэлементов и предпосевная влажность почвы.

5. Разработана методика и программное обеспечение для цифрового картографирования степени окультуренности почв. Проведенная с использованием этой методики сравнительная оценка сильно- и среднегумусированных агропочв (черноземов, темно-серых, серых) показала одинаковую их степень окультуренности, что связано с более высоким содержанием подвижного фосфора в менее гумусированных почвах. Установленные существенные различия в содержании нитратного азота, подвижного фосфора и обменного калия в сильно- и среднегумусированных почвах не оказали существенного влияния на общее содержание макроэлементов в надземной фитомассе выращиваемых культур.

6. Разработанная почвенно-геоморфологическая база данных позволила провести картографирование и установить закономерности пространственной изменчивости содержания гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв и почвообразующей породе. Выявлены тренды увеличения содержания гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв с северо-востока на юго-запад изучаемой территории. Аналогичный тренд отмечен для топографического индекса влажности. Для содержания физической глины и ила в почвообразующей породе установлены противоположные тренды, то есть отмечено увеличение содержания физической глины и ила с юго-запада на северо-восток.

7. С использованием новой классификации форм рельефа установлено, что почвы, занимающие долины рек и равнины, по сравнению с почвами привершинных склонов и высоких гребней холмов, характеризуются более высоким содержанием гумуса, физической глины и ила.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и/или WoS

1. Гопп, Н.В. Почвы юго-западной части Джулукульской котловины, Республика Алтай / Н.В. Гопп // Почвоведение. – 2015. – №6. – С. 656-667.
Gopp, N.V. Soils of the Southwestern Part of the Dzhulukul Depression in the Altai Republic / N.V. Gopp // Eurasian Soil Science. – 2015. – No. 6. – Vol. 48. – pp. 567-577.
2. Гопп, Н.В. Оценка влияния мезорельефа склона на пространственную изменчивость свойств почвы и характеристики растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли / Н.В. Гопп, Т.В. Нечаева, О.А. Савенков, Н.В. Смирнова, В.В. Смирнов // Исследование Земли из космоса. – 2016. – №3. – С.1-10.
Gopp, N.V. Effect of Slope Mesorelief on the Spatial Variability of Soil Properties and Vegetation Index Based on Remote Sensing Data / N.V. Gopp, T.V. Nechaeva, O.A. Savenkov, N.V. Smirnova, V.V. Smirnov // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2019. – Vol. 55. – No. 9. – pp. 1329-1337.
3. Гопп, Н.В. Методы геоморфометрии и цифрового картографирования для оценки пространственной изменчивости свойств агросерой почвы склона / Н.В. Гопп, Т.В. Нечаева, О.А. Савенков, Н.В. Смирнова, В.В. Смирнов // Почвоведение. – 2017. – № 1. – С. 24-34.
Gopp, N.V. The Methods of Geomorphometry and Digital Soil Mapping for Assessing Spatial Variability in the Properties of Agrogray Soils on a Slope / N.V. Gopp, T.V. Nechaeva, O.A. Savenkov, N.V. Smirnova, V.V. Smirnov // Eurasian Soil Science. – 2017. – Vol. 50. – No.1. – pp. 20-29.
4. Гопп, Н.В. Индикационные возможности NDVI в прогнозном картографировании свойств пахотного горизонта почв склоновых позиций на юге Западной Сибири / Н.В. Гопп, Т.В. Нечаева, О.А. Савенков, Н.В. Смирнова, В.В. Смирнов // Почвоведение. – 2017. – № 11. – С. 1-13.
Gopp, N.V. Indicative Capacity of NDVI in Predictive Mapping of the Properties of Plow Horizons of Soils on Slopes in the South of Western Siberia / N.V. Gopp, T.V. Nechaeva, O.A. Savenkov, N.V. Smirnova, V.V. Smirnov // Eurasian Soil Science. – 2017. – Vol. 50. – No.11. – pp. 1331-1342.
5. Гопп, Н.В. Использование NDVI в цифровом картографировании содержания подвижного лития в пахотном горизонте почв на юге Западной Сибири / Н.В. Гопп, О.А. Савенков, Т.В. Нечаева, Н.В. Смирнова // Исследование Земли из космоса. – 2017. – № 6. – С.26-30.
Gopp, N.V. The Use of NDVI in Digital Mapping of the Content of Available Lithium in the Arable Horizon of Soils in the Southwestern Siberia / N.V. Gopp, O.A. Savenkov, T.V. Nechaeva, N.V. Smirnova // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2018. – V.54. – No. 9. – pp. 1152-1157.
6. Гопп, Н.В. Связь показателя NDVI и урожайности яровой пшеницы со свойствами пахотного горизонта черноземов глинисто-иллювиальных элювиированных и темно-серых почв / Н.В. Гопп, О.А. Савенков // Почвоведение. –2019. – № 3. – С. 377-386.
Gopp, N.V., Savenkov O.A. Relationship between the NDVI, Yield of Spring Wheat and Properties of the Plow Horizon of Eluviated Clay-Illuvial Chernozems and Dark Gray Soils

/ N.V. Gopp, O.A. Savenkov // Eurasian Soil Science. – 2019. – Vol. 52. – No. 3. – pp. 339-347.

7. Гопп, Н.В. Использование NDVI в цифровом картографировании содержания фосфора в почвах и оценка обеспеченности им растений / Н.В. Гопп, О.А. Савенков, Т.В. Нечаева, Н.В. Смирнова, А.В. Смирнов // Исследование Земли из космоса. –2019. – №2. – С. 50-58.

Gopp, N.V., Savenkov O.A., Nechaeva T.V., Smirnova N.V., Smirnov A.V. Application of NDVI in Digital Mapping of Phosphorus Content in Soils and Phosphorus Supply Assessment in Plants / N.V. Gopp, O.A. Savenkov, T.V. Nechaeva, N.V. Smirnova, A.V. Smirnov // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2019. – V.55. – No.9. – pp. 1322-1328.

8. Гопп, Н.В. Цифровое картографирование урожайности яровой пшеницы на основе вегетационных индексов и оценка её изменений в зависимости от свойств антропогенно-преобразованных почв / Н.В. Гопп, О.А. Савенков, А.В. Смирнов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – №3. – С. 125-139.

Gopp, N.V. Digital mapping of spring wheat yield based on vegetation indices and estimation of its changes depending on the properties of anthropogenically transformed soils / N.V. Gopp, O.A. Savenkov, A.V. Smirnov // Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. – 2019. – Vol. 16. – Issue 3. – pp. 125-139.

9. Гопп, Н.В. Использование почвенно-геоморфологической базы данных для изучения пространственной изменчивости содержания гумуса, физической глины и ила в почвах Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции / Н.В. Гопп // Почвоведение. – 2021. – № 7. – С. 1-15

Gopp, N.V. The Use of the Soil-Geomorphological Database for Studying the Spatial Variability of the Humus Content, Physical Clay, and Clay in the Soils of the Kuznetsk–Salair Geomorphological Province / N.V. Gopp // Eurasian Soil Science. – 2021. – V. 54. – No. 7. – pp. 986-998.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК

10. Гопп, Н.В. Анализ количественных характеристик компонентов ландшафта, рассчитываемых по многозональной и радиолокационной съемке / Н.В. Гопп // Сибирский экологический журнал. – 2007. – №5. – С. 859-867.

11. Гопп, Н.В. Распознавание формаций лесной растительности с близкими спектрально-яркостными характеристиками по данным съемки со спутника LANDSAT 7 ETM+ / Н.В. Гопп, Е.А. Куликова, И.А. Пестунов, Ю.Н. Синявский, В.В. Смирнов // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12. – № 2. – С. 194-201.

12. Гопп, Н.В. Технология автоматизированного составления почвенных карт с использованием спутниковых данных / Н.В. Гопп // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Т. 18. – №12. – С. 195-200.

13. Гопп, Н.В. Моделирование запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений с использованием наземных и спутниковых данных / Н.В. Гопп // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Т. 17. – №12. – С. 200-205.

14. Гопп, Н.В. Алгоритмический подход при составлении цифровых почвенных карт на основе лабораторно-полевых и спутниковых данных / Н.В. Гопп // Исследование Земли из космоса. – 2013. – №2. – С. 1-15.

15. Гопп, Н.В. Влияние морфометрических характеристик рельефа на пространственную изменчивость содержания обменного калия в агросерой почве / Н.В. Гопп, О.А. Савенков, Т.В. Нечаева, В.В. Смирнов // Агрохимия. – 2014. – № 5. – С.56-65.

16. Гопп, Н.В. Применение цифровой модели высот (ASTER GDEM, 30 м) для оценки пространственной изменчивости содержания основных макроэлементов в агросерой почве склона / Н.В. Гопп, Т.В. Нечаева, О.А. Савенков, Н.В. Смирнова, В.В. Смирнов // Агрохимия. – 2016. – № 4. – С.46-54

17. Нечаева, Т.В. Изменение агрохимических параметров плодородия пахотных почв склона на юге Западной Сибири / Т.В. Нечаева, Н.В. Смирнова, **Н.В. Гопп**, О.А. Савенков // Плодородие. – 2017. – № 2 (95). – С. 2-5.

18. Нечаева, Т.В. Калийное состояние почв склонового агроландшафта на юго-востоке Западной Сибири / Т.В. Нечаева, **Н.В. Гопп**, О.А. Савенков, Н.В. Смирнова // Земледелие. – 2019. – №1. – С. 10-14.

19. Нечаева, Т.В. Фосфатное состояние почв склонового агроландшафта на юго-востоке Западной Сибири / Т.В. Нечаева, **Н.В. Гопп**, О.А. Савенков, Н.В. Смирнова // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. – 2019. – № 148. – С. 68-76.

Авторское свидетельство

20. Гопп, Н.В. Способ диагностики почвенного покрова по данным дистанционной информации / **Н.В. Гопп**, И.М. Гаджиев, Г.Х. Теплова // Государственный реестр изобретений Российской Федерации. – Москва, 2008. – № 2327987 от 27.06.2008 г.

Публикации в изданиях входящих в перечень РИНЦ, сборники конференций, конгрессов и съездов (наиболее значимые)

21. Гопп, Н.В. Применение цифровых моделей рельефа (ЦМР) в тематическом картографировании почвенного покрова республики Горный Алтай / Н.В. Гопп // Материалы IV съезда Докучаевского общества почвоведов. – Новосибирск, 2004. –С. 146.

22. Гопп, Н.В. Трехмерная визуализация поверхности земли и ГИС-технологии для моделирования и использования в почвоведении / Н.В. Гопп, В.В. Смирнов // Международный научный конгресс «Гео-Сибирь-2005». – Новосибирск, 2005. – Т. 5. –С. 274-278

23. Гопп, Н.В. Диагностика и картография почвенного покрова с использованием трехмерных моделей рельефа / Н.В. Гопп, В.В. Смирнов, О.В. Вологжина // Материалы международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2006». –Новосибирск, 2006. – Т. 3 (1). – С. 232-235.

24. Гопп, Н.В. Пространственная дифференциация парагенетических ландшафтов тундрового типа в окрестностях озера Джулукуль (Республика Алтай) / Н.В. Гопп, В.В. Смирнов // Материалы международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2007». – Новосибирск, 2007. – С. 203-206.

25. Гопп, Н.В. Исследование закономерностей латеральной дифференциации почвенного покрова в зависимости от факторов почвообразования с использованием многозональных и радиолокационных снимков / Н.В. Гопп, Е.А. Куликова, В.В.

Смирнов // Материалы международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2008». – Новосибирск, 2008. – С. 239-243.
26. Гопп, Н.В. Использование вегетационного индекса (NDVI) для оценки запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений / Н.В. Гопп, В.В. Смирнов // Материалы международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2009». –Новосибирск, 2009. – С. 187-191.
27. Гопп, Н.В. Исследование влияния рельефа и растительности на почвенный покров / Н.В. Гопп // Материалы международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2012». – Новосибирск, 2012. – Т.4. – Ч.2. – С. 82-87.
28. Нечаева, Т.В. Оценка пространственной изменчивости свойств почв склонового агроландшафта Предсалаирья / Т.В. Нечаева, **Н.В. Гопп**, Н.В. Смирнова, О.А. Савенков // Материалы Всероссийской научной конференции III Ковалевские молодежные чтения «Почва – ресурс экологической и продовольственной безопасности». – Томск, 2016. – С. 152-158.
29. Gopp, N.V. The content of mobile lithium in the plow layer of soils of slopes and its relationship with NDVI and soils properties / N.V. Gopp, O.A. Savenkov, T.V. Nechaeva, N.V. Smirnova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 201, 6th Scientific Conference with international participation «Reflection of Bio-, Geo-, Anthropospheric Interactions in Soils and Soil Cover» in memory of R.S. Ilyin. – Tomsk, 2016. – pp. 1-5.
30. Гопп, Н.В. Цифровое картографирование степени окультуренности пахотных почв Предсалаирской дренированной равнины / Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. // Почвы и окружающая среда. – 2018. – Т.1. – №1. – С.32-44.
31. Gopp, N.V. The informativeness of NDVI in studying the patterns of spatial variation of magnesium content in soils and plants / N.V. Gopp, T.V. Nechaeva, O.A. Savenkov, N.V. Smirnova, V.P. Tarkhova, A.V. Smirnov // Ceur Workshop Proceedings. SDM 2019 – Proceedings of the All-Russian Conference «Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes». – 2019. – pp. 338-343
32. Нечаева, Т.В. Магний в почвах и растениях в условиях склонового агроландшафта на юго-востоке Западной Сибири / Т.В. Нечаева, **Н.В. Гопп**, О.А. Савенков, Н.В. Смирнова // Почвы и окружающая среда. – 2019. – Т.2. – №4. – С.1-20.