

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4:631.452:528.88

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЧВЕННО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА, ФИЗИЧЕСКОЙ ГЛИНЫ И ИЛА В ПОЧВАХ КУЗНЕЦКО-САЛАИРСКОЙ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ

© 2021 г. Н. В. Гопп*

*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН,
пр. Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирская область, Новосибирск, 630090 Россия*

**e-mail: gopp@issa-siberia.ru*

Поступила в редакцию 14.07.2020 г.

После доработки 09.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

На основе архивных данных о почвах Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции (в пределах Новосибирской области) и результатов обработки цифровых моделей высот разработана почвенно-геоморфологическая база данных (ПГБД) для сбора, хранения и обработки пространственно-распределенной информации. ПГБД состоит из таблиц и связанных с ними векторных и растровых картографических данных, которые содержат информацию о химических и физических свойствах почвенных горизонтов, морфометрических параметрах рельефа (высоте, крутизне, топографическом индексе влажности, факторе риска развития эрозии, индексе мощности потока, индексе расчлененности рельефа, индексе топографического положения и др.). На территории исследования распространены следующие почвы: черноземы выщелоченные (Luvic Chernozems) и оподзоленные (Luvic Greyzemic Chernozems); лугово-черноземные обыкновенные (Gleyic Chernozems) и оподзоленные (Greyzemic Gleyic Chernozems); светло-серые, серые и темно-серые лесные (Luvic Greyzemic Phaeozems); луговые карбонатные (Eutric Gleysols), оподзоленные (Haplic Gleysols) и солончаковатые (Haplic Gleysols (Protosalic)); аллювиальные луговые (Eutric Fluvisols); солонцы луговые (Gleyic Solonetz). Анализ составленных карт позволил выявить тренд 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 установлена обратная тенденция, то есть отмечено увеличение содержания физической глины и ила с юго-запада на северо-восток. Установлено, что почвы, занимающие долины рек и равнины, по сравнению с почвами привершинных склонов и высоких гребней холмов, характеризуются большим содержанием гумуса, физической глины и ила. Существенных корреляций между морфометрическими параметрами рельефа и содержанием гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв и почвообразующей породе не выявлено.

Ключевые слова: морфометрические параметры рельефа, картографирование, LS-factor, SPI, TWI, TRI, TPI, SRTM, DEM

DOI: 10.31857/S0032180X21070054

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие интенсивно ведутся исследования в области цифрового картографирования пространственной изменчивости параметров наземных экосистем с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). ДДЗЗ в дополнение к традиционным контактными методом обследования позволяют значительно сократить объемы полевых работ и увеличить информативность картографических материалов. Несмотря на достигнутый прогресс в

области цифрового картографирования, основанного на использовании ДДЗЗ, пока еще нельзя уверенно сказать, что его можно осуществлять без результатов натурных и лабораторно-полевых исследований почв. Поэтому для реализации современных методов анализа пространственно-распределенной информации необходимо разрабатывать базы данных (БД). Совокупное использование БД с ДДЗЗ позволяет существенно увеличить информативность составляемых тематических карт, отражающих закономерности пространственной изменчивости почв и их свойств.

База (пространственных) данных – это совокупность пространственных данных, организованных по определенным правилам, устанавливающим общие принципы описания, хранения и манипулирования данными, предназначенная для удовлетворения информационных потребностей пользователя (ГОСТ Р 52438-2005). В различных странах на протяжении уже двух десятков лет продолжают создаваться следующие информационные почвенные системы: European Soil Database (Европа), ASRIS (Australian Soil Resource Information System, Австралия), NASIS (National Soil Information System, США), SOTER (Soil Terrain Database, для всех стран) и др. [24, 27, 32, 41, 44, 46]. В России имеются немногочисленные разработки в этом направлении, например, разработаны унифицированная БД по почвам бореальных лесов “BoREAL” [2], региональная БД о составе и свойствах почв Ростовской области [10], почвенно-географическая БД России [14, 21]. Региональные БД о составе и свойствах почв необходимо создавать для пополнения единых почвенных БД Российской Федерации.

БД создаются для хранения, обработки и сортировки сведений о почвах, проведения интерактивных запросов и вычислений, представления любых массивов как в текстовом, так и в картографическом видах. БД, созданные с использованием ГИС-технологий, необходимы для реализации методов цифрового почвенного картографирования (ЦПК). Основная задача ЦПК сводится к интеграции знаний о факторах дифференциации почв в сочетании с ДДЗЗ и точечными наземными наблюдениями [15, 21, 25, 31, 33, 34]. Основным теоретическим базисом ЦПК является идея и формула В.В. Докучаева о почве как функции от факторов почвообразования. В зарубежных исследованиях подобную, несколько видоизмененную формулу ввел Г. Йенни. Позже эта формула была дополнена и применительно к ЦПК ее стали называть моделью SCORPAN [35]. Согласно исследованиям [16, 35], модель SCORPAN предложена для эмпирического количественного описания взаимосвязей между почвой и пространственно распределенными предикторами. Формулы моделей SCORPAN выглядят следующим образом:

$$Sc = f(s, c, o, r, p, a, n) \text{ и}$$

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

где Sc – почвенные таксономические единицы; Sa – количественная характеристика почвы; s – почва (другие характеристики почвы); c – климат (локальные климатические характеристики); o – организмы, растительность, фауна, человек; r – рельеф (морфометрические величины); p – материнская порода, литология; a – возраст, время; n – пространственное положение.

Среди перечисленных факторов особенно выделяется рельеф, так как он оказывает существенное влияние на формирование почв. Прямое влияние рельефа заключается в иницировании 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 [7, 11, 17, 19]. Цифровые модели высот и автоматизация трудоемких расчетов в геоморфометрии позволяют получать более содержательную информацию о морфометрических параметрах рельефа (МПР), которые находят свое применение при изучении пространственной изменчивости свойств почвы и являются базовой картографической основой для моделирования. Изучение связей между почвой и рельефом позволяет косвенно охарактеризовать термический и гидрологический режимы почв, поэтому МПР используются для создания математических моделей.

Цель настоящей работы состоит в изучении закономерностей пространственной изменчивости содержания гумуса, физической глины и ила с использованием почвенной базы данных и морфометрических параметров рельефа, рассчитанных по цифровой модели высот.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Согласно геоморфологическому районированию [18], территория исследования находится в западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции (юго-восток Западно-Сибирской равнины, Новосибирская область, Искитимский район) и занимает площадь 4384 км² (рис. 1). Территория исследования относится к лесостепной зоне и представлена денудационно-аккумулятивным типом рельефа [9, 12, 13].

Преобладающая часть почв (черноземы, темно-серые лесные, серые и светло-серые лесные почвы) формируется на лёссовидных карбонатных суглинках. На оглеенных лёссовидных суглинках формируются лугово-черноземные и луговые почвы, на аллювиальных отложениях рек (супесях и песках) – аллювиальные луговые почвы. Гранулометрический состав почвообразующих пород и почв в основном представлен средними и тяжелыми суглинками (иловато-пылеватые). Названия таксономических единиц почв приведены по Классификации почв СССР [8] и представлены в табл. 1.

Гидрографическая сеть представлена большим количеством рек и ручьев, глубина вреза которых оказывает влияние на дренированность террито-

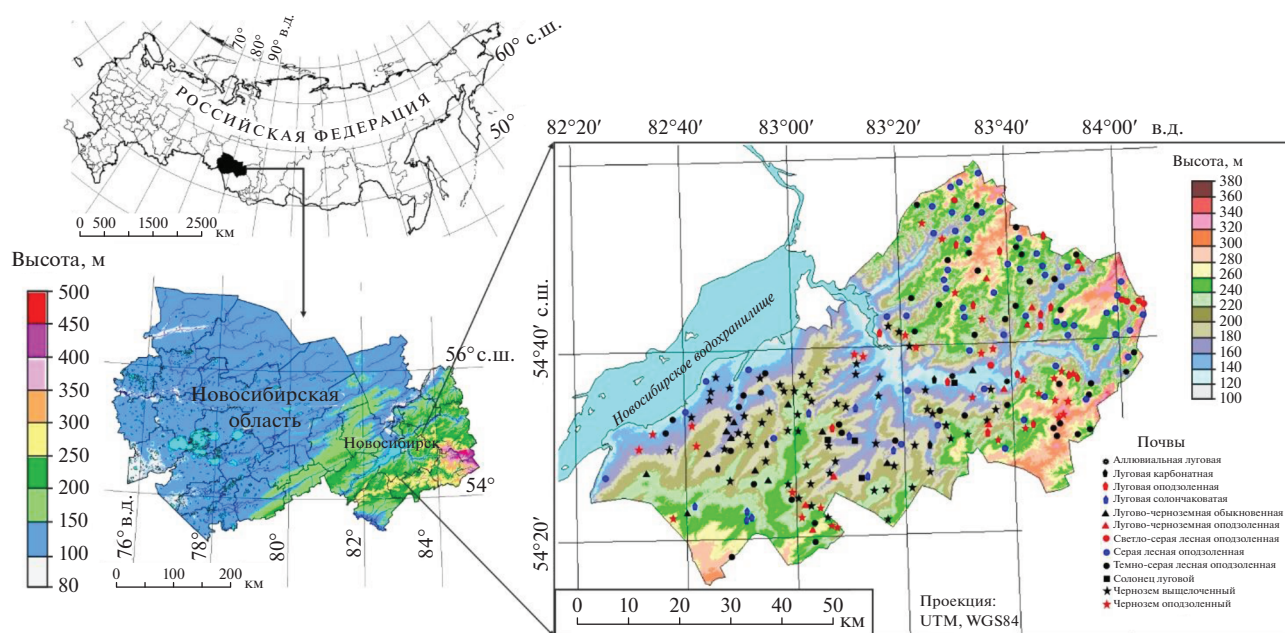


Рис. 1. Карта территории исследования и схема расположения почвенных разрезов ($n = 263$).

рии и на развитие эрозионных процессов. На повышенных элементах рельефа глубина залегания грунтовых вод составляет 8–10 м, на пониженных – 1.5–2 м. Климат на территории исследования континентальный. Средние температуры: годовая – -0.3°C ... -0.6°C , января – -19°C , июля $+19^{\circ}\text{C}$. Количество осадков варьирует в пределах от 400 до 450 мм/год.

Для создания почвенно-геоморфологической базы данных (ПГБД) использовали архивные данные проектного института по землеустройству “ЗАПСИБГИПРОЗЕМ”, полученные в 1984–1990 гг. при проведении полевых и лабора-

торно-аналитических работ, включающие в себя почвенные карты и отчеты. База данных состоит из таблиц и связанных с ними векторных и растровых картографических данных, полученных с помощью обработки архивных материалов и цифровых моделей высот (ЦМВ). ЦМВ и база данных точек пробоотбора были приведены к единой системе координат – проекция UTM (Universal Transverse Mercator), эллипсоид WGS84. В работе использовали цифровую модель высот SRTM v.3 (Shuttle Radar Topography Mission), имеющую разрешение на широте Новосибирской области $2'' \times 1''$ угловых секунд, что соответственно составляет около

Таблица 1. Почвы исследуемой территории

Название почв по классификации СССР (1977 г.)	Название почв по WRB (2014 г.)
Аллювиальная луговая	Eutric Fluvisols
Луговая карбонатная	Eutric Gleysols
Луговая оподзоленная	Haplic Gleysols
Луговая солончаковатая	Haplic Gleysols (Protosalic)
Лугово-черноземная обыкновенная	Gleyic Chernozems
Лугово-черноземная оподзоленная	Greyzemic Gleyic Chernozems
Светло-серая лесная оподзоленная	Luvic Greyzemic Phaeozems
Серая лесная оподзоленная	Luvic Greyzemic Phaeozems
Темно-серая лесная оподзоленная	Luvic Greyzemic Phaeozems
Солонец луговой	Gleyic Solonetz
Чернозем выщелоченный	Luvic Chernozems
Чернозем оподзоленный	Luvic Greyzemic Chernozems

35 × 30 м. После преобразования в проекцию UTM, разрешение используемой в дальнейшем ЦМВ не изменилось. Уточнить необходимую информацию относительно разрешения цифровой модели высот на разных широтах и пересчитать угловые секунды в метры можно по ссылкам [39, 45]. Цифровая модель высот SRTM v.3 выбрана для проведения исследования в связи с тем, что в ней восстановлены отсутствующие данные с использованием цифровых моделей высот из открытых источников (ASTER GDEM2, GMTED2010 и NED).

На основе ЦМВ в каждой ячейке раstra рассчитывали следующие морфометрические параметры рельефа: крутизна, фактор риска развития эрозии (Slope Length and Steepness factor, LS-factor), индекс мощности потока (Stream Power Index, SPI), топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index, TWI), индекс расчлененности (пересеченности) рельефа (Terrain Ruggedness Index, TRI), индекс топографического положения (Topographic Position Index, TPI). Данные параметры рельефа выбраны в связи с тем, что на данной территории имеются участки с наличием и отсутствием эрозионно-опасных склонов, это являлось необходимым критерием для проведения сравнительной характеристики свойств почв, занимающих различные геоморфологические позиции (ГП). Более подробное описание вышеперечисленных МПР можно найти в следующих исследованиях [22, 23, 26, 29, 36, 43, 46–49]. Для составления карт МПР использовали свободно распространяемое программное обеспечение SAGA GIS [25, 37, 38].

Работа по созданию ПГБД предусматривала следующие этапы: 1 – сбор архивных материалов, содержащих сведения о физических и химических свойствах почв; 2 – географическую привязку почвенных карт и точек пробоотбора к снимкам сервиса Google Earth; 3 – составление цифровых карт почвенных свойств; 4 – составление карт морфометрических параметров рельефа. Всего в базе данных насчитывается 263 описания почвенных разрезов.

Содержание гумуса определено мокрым сжиганием по Тюрину, физической глины (<0.01 мм) и ила (<0.001 мм) – по Качинскому [1, 4].

Для построения диаграмм и карт почвенных свойств использовали данные по физическим и химическим свойствам, которые характеризуют пахотный (для агропочв) и гумусовый горизонты (для почв естественных ландшафтов, пастбищ и сенокосов). Мощность пахотного горизонта различных типов агропочв составляла 30 см с варьированием ± 5 см. Мощность гумусового горизонта в почвах естественных ландшафтов (пастбищ, сенокосов) составляла для серых лесных почв преимущественно 20 см с варьированием ± 3 см, для черноземов – 30 ± 5 см. Ввиду того, что название

горизонтов у почв пахотных и естественных сельскохозяйственных угодий разное, то далее по тексту использовали обобщающий термин “верхний горизонт”. Данные по содержанию физической глины и ила в почвообразующих породах с глубины 140–150 см использовали для построения корреляционной матрицы и соответствующих карт.

Анализ данных на соответствие нормальному распределению проведен с помощью критерия Шапиро–Уилка. В значительном количестве выборок имелись отклонения от нормального распределения, поэтому для множественных сравнений независимых выборок использовали тест Краскала–Уоллиса (непараметрический аналог дисперсионного анализа ANOVA). Для корректировки значений уровней значимости при проведении множественных сравнений использовали метод Хольма [30]. Корреляционный анализ проводили по Спирмену.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

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. 1). 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 (рис. 2). Значения МПР под каждым точечным объектом экспортировали с различных карт в создаваемую базу данных для дальнейшего анализа и составления диаграмм.

Анализ карты крутизны склонов показывает, что наибольшие значения характерны для северной и восточной частей изучаемой территории, что связано с увеличением расчлененности рельефа (рис. 2, А). Характеристика склонов по крутизне представлена на карте по Брауде [3]: 0–1 – слабопогоние; 1–2 – погоние; 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 больше значение крутизны склона, тем больший ущерб будет причинен почвам в результате их размыва. Анализ диаграмм показывает, что почвы, занимающие слабопогоние склоны, отличаются большим содержанием гумуса в верхнем горизонте почв по сравнению с почвами, залегающими на покато-крутых склонах (рис. 3, А, I). Аналогичная закономерность характерна и для содержания ила в почвах (рис. 3, А, III). Отличий

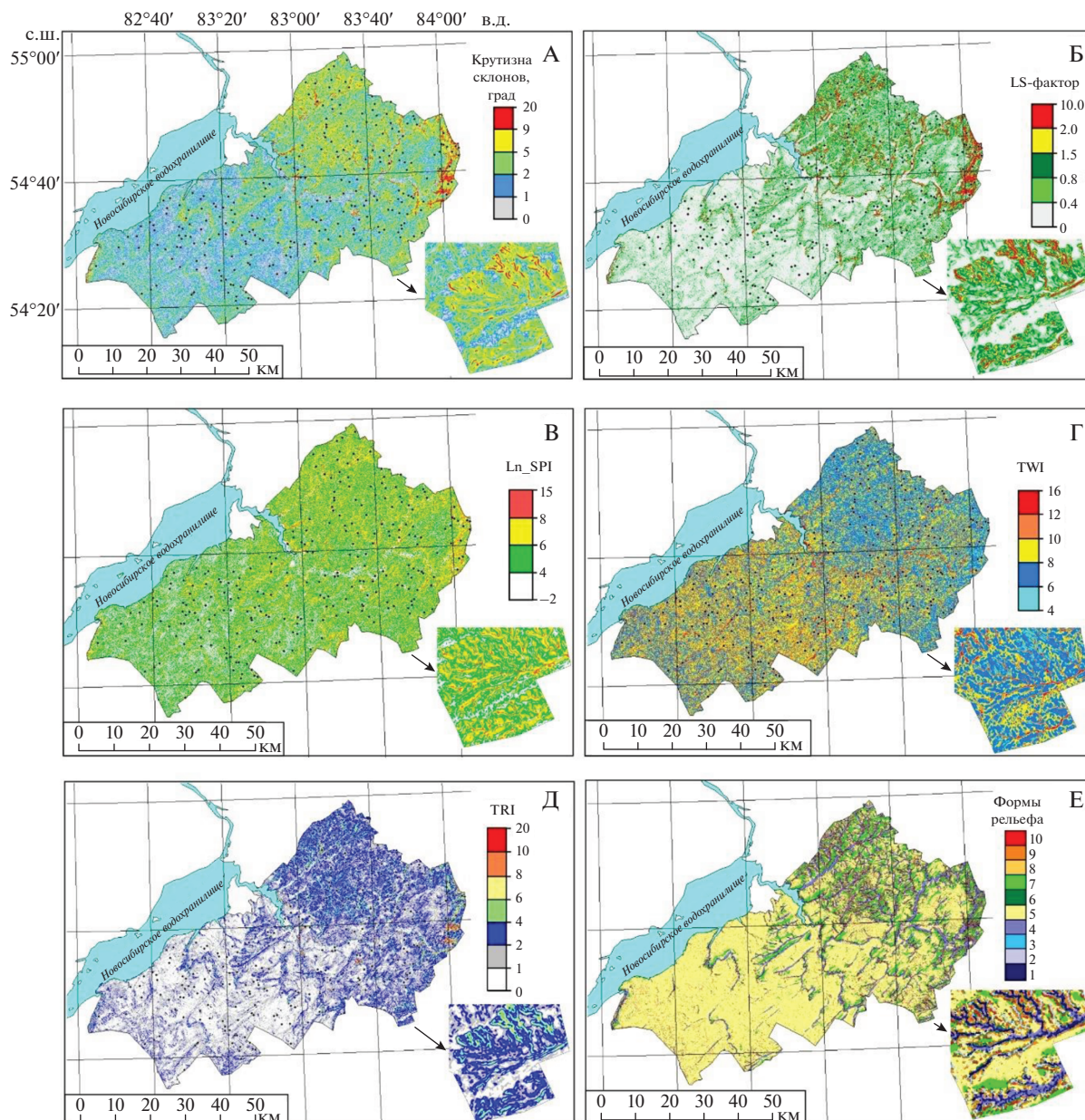


Рис. 2. Карты МПР: А – крутизна склонов; Б – фактор риска развития эрозии (LS-фактор); В – индекс мощности потока (SPI, логарифмированные значения); Г – топографический индекс влажности (TWI); Д – индекс расчлененности рельефа (TRI); Е – формы рельефа. Условные обозначения для рис. 2, Е: 1 – каньоны, глубоко врезанные балки, русла рек, ручьев; 2 – дренажная сеть средней части склонов (неглубоко врезанные балки, 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 ($>5^\circ$); 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.

по содержанию физической глины в верхнем горизонте почв, занимающих ГП с разным диапазоном крутизны, не выявлено (рис. 3, А, II). Матрица корреляций показывает, что тесных зависимостей между крутизной склонов и изучаемыми почвенными характеристиками не установлено (табл. 2). Это можно объяснить тем, что ливневые и талые

воды не стекают сплошным слоем по склону, а собираются в струйки или ручейки, обычно по днищам лощин или балок, которые постепенно приобретают кинетическую энергию, способную выносить почвенные частицы [3]. Вследствие чего на крутых склонах формируются эрозионные лощины, смыто-намытый почвенный слой, а также

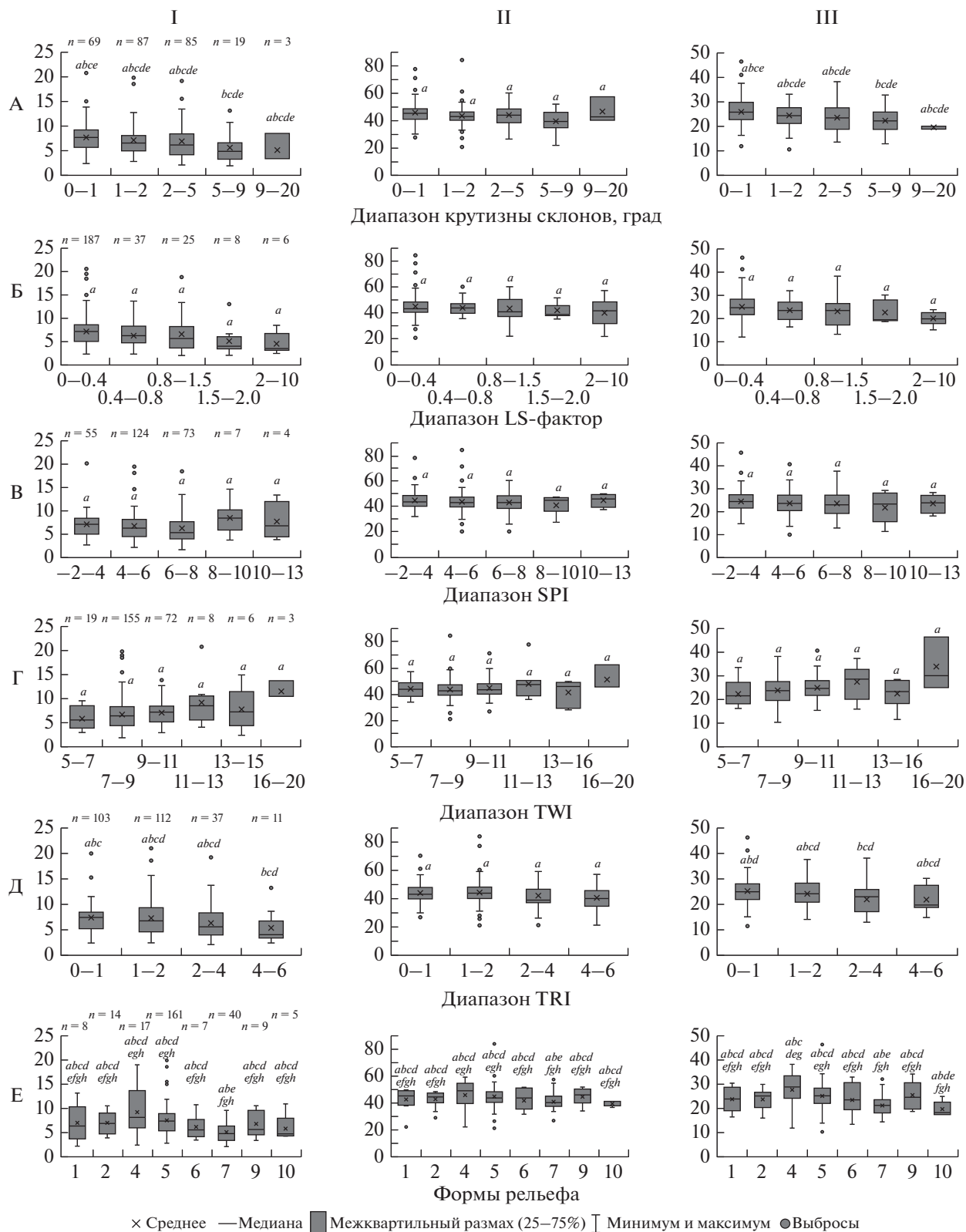


Рис. 3. Варьирование содержания (%) гумуса (I), физической глины (II) и ила (III) в верхнем горизонте почв, занимающих геоморфологические позиции с разными диапазонами морфометрических параметров и формами рельефа (обозначение форм рельефа приведено на рис. 2). Примечание: одинаковые буквы над диаграммами размаха обозначают отсутствие достоверных различий между выборками ($p < 0.05$).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Спирмена между свойствами верхнего горизонта почв, почвообразующей породы и морфометрическими параметрами рельефа ($n = 263, p < 0.05$)

Показатель	Гумус	Физическая глина (ВГП)	Ил (ВГП)	Физическая глина (ПП)	Ил (ПП)	Высота	Крутизна	LS-factor	SPi	TWi	TRi	TRP	Формы рельефа
Гумус	—	0.54	0.51	-0.13	-0.13	-0.23	-0.28	-0.25	-0.14	0.18	-0.21	x	-0.26
Физическая глина (ВГП)	0.54	—	0.78	0.21	0.16	x	-0.15	-0.13	x	x	x	x	-0.18
Ил (ВГП)	0.51	0.78	—	x	x	-0.17	-0.25	-0.24	-0.14	0.18	-0.20	-0.14	-0.24
Физическая глина (ПП)	-0.13	0.21	x	—	0.91	0.43	0.21	0.23	0.13	x	0.25	x	0.12
Ил (ПП)	-0.13	0.16	x	0.91	—	0.41	0.21	0.22	x	x	0.25	x	x
Высота	-0.23	x	-0.17	0.43	0.41	—	0.23	0.22	x	-0.19	0.27	0.14	0.25
Крутизна	-0.28	-0.15	-0.25	0.21	0.21	0.23	—	0.95	0.49	-0.62	0.87	x	0.16
LS-factor	-0.25	-0.13	-0.24	0.23	0.22	0.22	0.95	—	0.70	-0.40	0.87	x	x
SPi	-0.14	x	-0.14	0.13	x	x	0.49	0.70	—	0.27	0.51	-0.47	-0.24
TWi	0.18	x	0.18	x	x	-0.19	-0.62	-0.40	0.27	—	-0.45	-0.56	-0.42
TRi	-0.21	x	-0.20	0.25	0.25	0.27	0.87	0.87	0.51	-0.45	—	x	x
TRP	x	x	-0.14	x	x	0.14	x	x	-0.47	-0.56	x	—	0.66
Формы рельефа	-0.26	-0.18	-0.24	0.12	x	0.25	0.16	x	-0.24	-0.42	x	0.66	—

Примечание. Здесь и далее в таблицах: p – вероятность ошибки; n – количество почвенных проб; x – корреляция между показателями не значима; ВГП – верхний горизонт почв; ПП – почвообразующая порода. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, характеризующие заметную и высокую силу связи.

слой, мало затронутый процессами эрозии, для которых характерна значительная вариабельность почвенных характеристик. Установлено, что существенное уменьшение содержания гумуса, физической глины и ила происходит в эрозионных лощинах и балках [5]. Информация о почвах лощин и балок не отражена в архивных данных и, следовательно, не занесена в БД. Диапазон варьирования изучаемых почвенных свойств будет более широким с уменьшением среднего значения, если результаты обследования по почвам эрозионных лощин и балок включить в созданную БД. Кроме того, необходимо отметить, что в почвенных выборках присутствуют разные типы почв, которые отличаются по содержанию гумуса и занимают различные ГП, это обстоятельство тоже приводит к увеличению вариабельности.

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 [26, 40]. LS-factor используется в моделях универсальных уравнений потерь почвы USLE (Universal Soil Loss Equation) и RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), которые являются наиболее часто используемыми моделями для оценки риска эрозии и потерь почв [42, 50]. Анализ карты показывает, что наибольшие значения LS-factor характерны для северной и восточной частей изучаемой территории, что связано с увеличением расчлененности рельефа и крутизны склонов, а также наличием длинных склонов (рис. 2, Б). Градации риска развития эрозии по 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 почв, занимающих ГП с разным диапазоном LS-factor, не наблюдается (рис. 3, Б, I–III). Корреляции между изучаемыми почвенными характеристиками и LS-factor слабые (табл. 2). Причины отсутствия различий между выборками свойств почв, занимающих ГП с различным диапазоном LS-factor, упомянуты при обсуждении такого параметра рельефа, как крутизна.

Индекс мощности потока (Stream Power Index, SPI) рассчитывается на основе данных о площади удельного водосбора и крутизне склонов [36]. Чем больше значения SPI, тем выше вероятность развития эрозионных процессов. Анализ карты показывает, что наибольшие значения SPI характерны для северной и восточной частей изучаемой территории, что связано с увеличением расчлененности рельефа (рис. 2, В). Анализ диаграмм показывает, что отличий между выборками

почв по содержанию гумуса, физической глины и ила с различным диапазоном SPI не наблюдается (рис. 3, В, I–III).

Топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index, TWI) разработан для характеристики гидрологических процессов, протекающих в различных сферах Земли [22]. 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 на пониженных участках, то есть, если имеются понижения на возвышенных участках, это отражается в увеличении значений индекса TWI относительно прилегающих возвышенных участков. Анализ карты показывает, что наибольшие значения TWI наблюдаются на равнинной юго-западной части изучаемой территории, рельеф которой способствует замедлению поверхностного и внутрпочвенного стока (рис. 2, Г). Различий по содержанию гумуса, физической глины и ила между выборками почв, занимающих ГП с разным диапазоном TWI, не обнаружено (рис. 3, 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 (табл. 2).

Индекс расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index, TRI) характеризует вертикальную неоднородность рельефа [43]. Этот индекс определяется как сумма разниц между высотой восьми пикселей и центрального пикселя, находящегося внутри сетки. 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 – сильно расчлененный рельеф (рис. 2, 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 с большим содержанием гумуса по сравнению с почвами на значительно расчлененном рельефе (рис. 3, Д, I). Содержание ила в почвах, занимающих среднерасчлененный рельеф, было меньше по сравнению с почвами на нерасчлененном ре-

льефе (рис. 3, Д, III). В остальных случаях различия между изучаемыми свойствами почв в выборках недостоверны (рис. 3, Д, I–II).

Индекс топографического положения (Topographic Position Index, TPI) представляет собой разницу между средней высотой области ячеек локальной сетки и средней высотой ячеек в окружающей окрестности [47]. В настоящем исследовании карта TPI составлена с использованием следующих радиусов: внутренний – 100 м, внешний – 1000 м. Значения TPI больше нуля показывают самые высокие ГП, например, это могут быть вершины гор, холмов, сопок и др. Отрицательные значения TPI представляют собой пониженные 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 [29, 47]. 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 балками (рис. 2, 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. 3, Е, I–III). Таким образом, в почвах пониженных форм рельефа (долины, равнины) происходит накопление гумуса, физической глины и ила вследствие действия экзогенных процессов (поступления 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 с использованием геостатистического метода (рис. 4). Установлено, что с северо-востока на юго-запад исследуемой территории содержание гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв существенно увеличивается (рис. 4, А–В). Аналогичный тренд выявлен и для топографического индекса влажности (TWI), значения которого также увеличиваются с северо-востока на юго-запад (рис. 2, Г). Однако корреляции между TWI и параметрами почв несущественны (табл. 2). 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 [6, 20]. Кроме того, согласно исследованиям [28], важное значение имеет оптимальный размер сетки цифровой модели высот, правильный подбор которой позволяет увеличить коэффициенты корреляции. В настоящем исследовании сделана попытка увеличения (до 20×20 м) и уменьшения (до 60×60 и 100×100 м) разрешения цифровой модели высот, имеющей исходное разрешение 35×30 м. 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. 3). Данная особенность, по всей видимости, связана со следующими неучтенными факторами: 1 – неравномерным количеством поступавших растительных остатков в почву в течение всего периода почвообразования; 2 – неравномерным перераспределением почвенного материала по поверхности Земли в результате протекающих эрозийных процессов; 3 – внесением органических удобрений; 4 – наличием стратификации почвообразующих пород и др. Также значительное влияние на результаты корреляционного анализа оказывает количество точек опробования, разрешение исходной цифровой модели высот и охват территории опробования. Если корреляционный анализ проводится с данными, полученными для одной водораздельной территории, то, как правило, коэффициенты корреляции между МПР и почвенными свойствами высокие. Если территория охватывает несколько водораздельных территорий, или, как у нас в исследовании, равнинную и возвышенную с большим количеством точек опробования поверхности, то в данном случае наблюдаются невысокие коэффициенты корреляции между МПР и свойствами почв.

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. 4, Б–Д). По всей видимости, почвообразующие породы изучаемой территории характеризуются слоистостью, сформированной в четвертичное время. Такое строение почвообразующих пород характерно для переходной зоны между горной областью и равнинной территорией. Коэффициенты корреляции между изучаемыми физическими свойствами верхнего горизонта почв и почвообразующих пород несущественны (табл. 2).

Содержание гумуса в верхнем горизонте почв варьировало в пределах от 2 до 20% (рис. 5). Наименьшее содержание гумуса в верхнем горизонте почв характерно для светло-серых лесных почв, среднее – для черноземов, наибольшее – для раз-

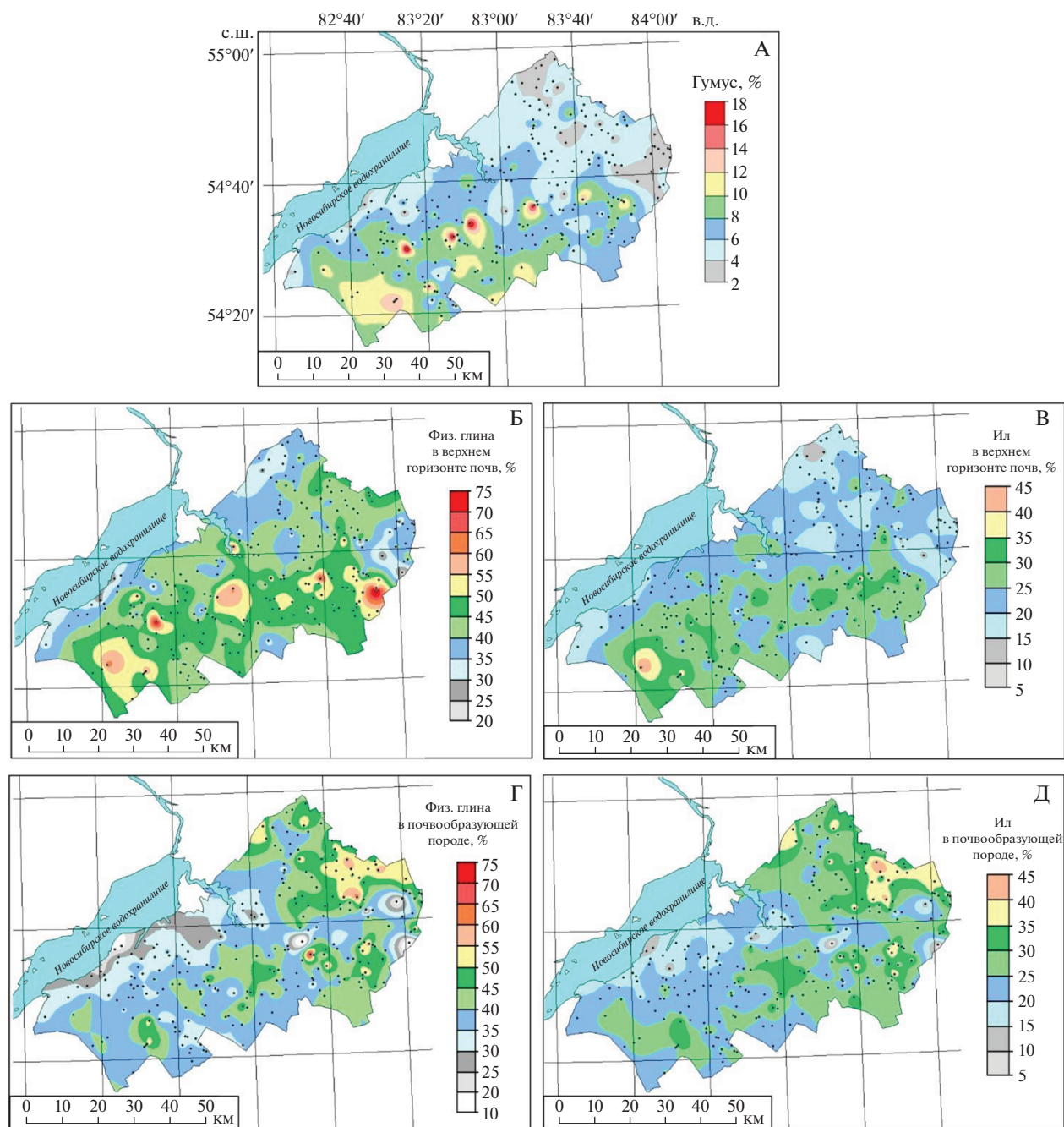


Рис. 4. Карты содержания: А – гумуса в верхнем горизонте почв; Б – физической глины в верхнем горизонте почв; В – ила в верхнем горизонте почв; Г – физической глины в почвообразующей породе; Д – ила в почвообразующей породе.

ных родов луговых почв (обыкновенных, солончатых, 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. 5, А–В). Серые и темно-серые лесные почвы по содержанию физической глины и ила в почвообразующей породе отличались более высокими значениями по сравнению с черноземами выщелоченными (рис. 5, Г, Д). В остальных почвах различия между изучаемыми свойствами верхнего горизонта почв и почвообразующих пород в выборках недостоверны (рис. 5, А–Д).

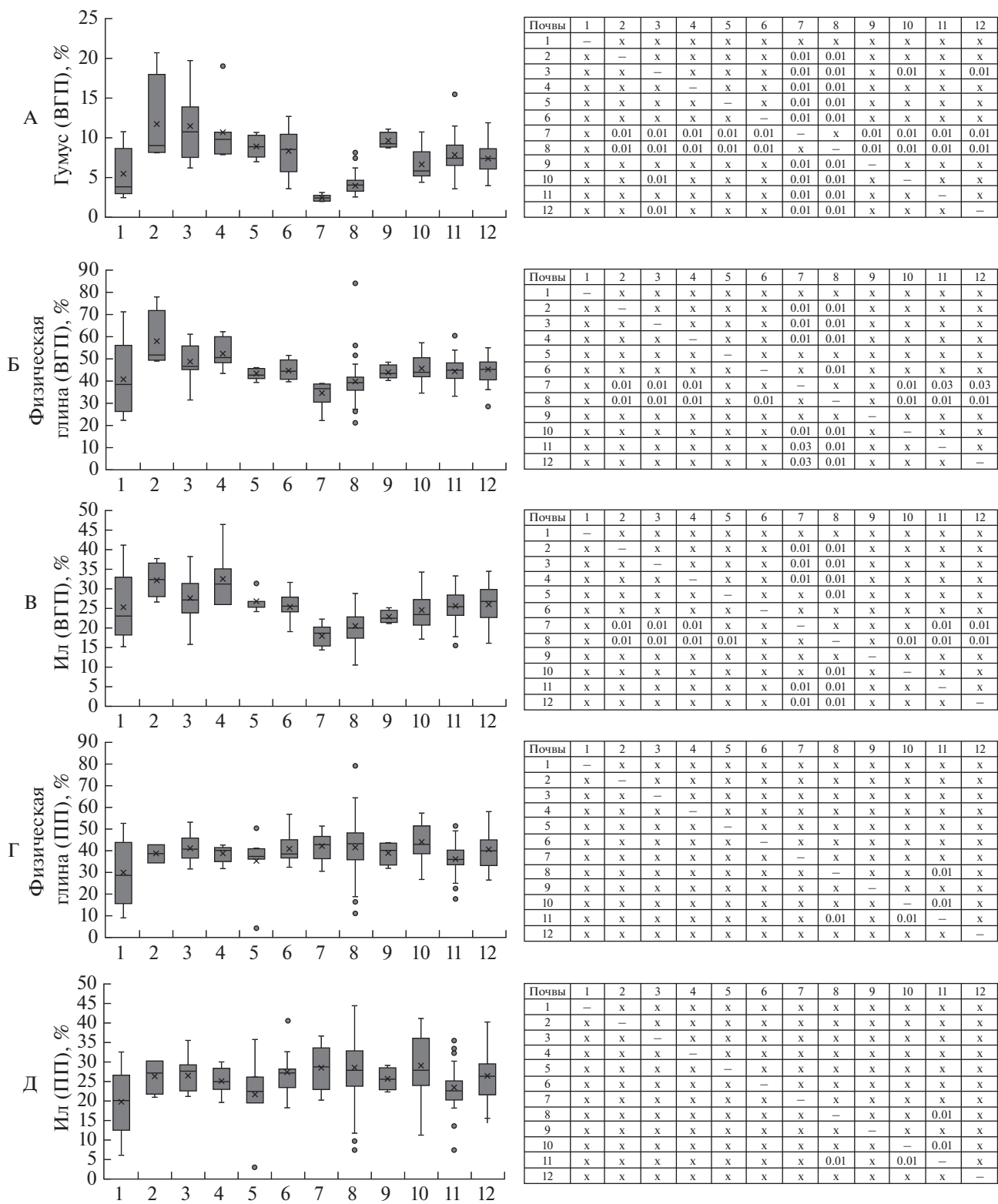


Рис. 5. Варьирование содержания гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв (ВГП) и почвообразующей породе (ПП). Почвы: 1 – аллювиальная луговая (n = 6); 2 – луговая карбонатная (n = 5); 3 – луговая оподзоленная (n = 16); 4 – луговая солончаковатая (n = 7); 5 – лугово-черноземная обыкновенная (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, крестиком обозначены не значимые отличия.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмена между почвенными свойствами и морфометрическими параметрами рельефа, рассчитанными по 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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 установлена обратная тенденция, то есть отмечено увеличение содержания изучаемых показателей с юго-запада на северо-восток, что, по всей видимости, обусловлено слоистостью почвообразующих пород, сформированной в четвертичное время. 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.

Необходимо отметить, что существенные корреляции между МПР и содержанием гумуса, физической глины и ила в верхнем горизонте почв и почвообразующей породе не выявлены. Данная особенность может быть связана с наличием неучтенных факторов, которые вносят больший вклад в дисперсию зависимых признаков, например, это может быть связано с количеством поступивших растительных остатков в почву в течение всего периода почвообразования, неравномерным перераспределением почвенного материала по поверхности Земли в результате протекающих эрозийных процессов, внесением органических удобрений, наличием слоистости почвообразующих пород и др. Необходимо также 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.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность О.А. Савенкову за помощь в сборе архивных материалов на начальном этапе работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. Белоусова Н.И., Мешалкина Ю.Л. Опыт создания унифицированной базы данных бореальных почв России (методические вопросы) // Почвоведение. 1997. № 8. С. 926–933.
3. Брауде И.Д. Эрозия почв, засуха и борьба с ними в ЦЧО. М.: Наука, 1965. 140 с.
4. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 415 с.
5. Гонн Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Индикационные возможности NDVI для прогнозного картографирования свойств пахотного горизонта почв склоновых позиций на юге Западной Сибири // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1377–1389.
6. Гонн Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Методы геоморфометрии и цифрового картографирования для оценки пространственной изменчивости свойств агросерой почвы склона // Почвоведение. 2017. № 1. С. 24–34.
7. Джеррард А.Д. Почвы и формы рельефа. Л.: Недра, 1984. 208 с.
8. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
9. Ковалев Р.В. Почвы Новосибирской области. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1966. 422 с.
10. Крыщенко В.С., Голозубов О.М., Колесов В.В., Рыбьянец Т.В. База данных состава и свойств почв. Ростов-на-Дону: Изд-во РСЭИ, 2008. 145 с.
11. Неуструев С.С. Генезис и география почв. М.: Наука, 1977. 328 с.
12. Орлов А.Д. Эрозия и эрозионноопасные земли Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 208 с.
13. Растительность степной и лесостепной зон Западной Сибири (Новосибирская область и Алтайский край) / Отв. ред. А.В. Куминова. Тр. Центр. сиб. ботан. Сада. Вып. 6. Новосибирск: Изд-во АН СССР. Сиб. отд-ние, 1963. 441 с.
14. Рожков В.А., Алябина И.О., Колесникова В.М., Молчанов Э.Н., Шоба С.А., Столбовой В.С. Почвенно-географическая база данных России // Почвоведение. 2010. № 1. С. 3–6.
15. Сорокина Н.П. Методология составления крупномасштабных агроэкологически ориентированных почвенных карт. М.: Россельхозакадемия, 2006. 159 с.
16. Флоринский И.В. Гипотеза Докучаева как основа цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125-летию публикации) // Почвоведение. 2012. № 4. С. 500–506.
17. Флоринский И.В., Айлерс Р.Дж., Бертон Д.Л., Мак-Магон Ш.К., Монреал К.М., Фаренхорст А. Прогнозное почвенное картографирование на основе цифрового моделирования рельефа // Геоинформатика. 2009. № 1. С. 22–32.
18. Чернов Г.А., Вдовин В.В., Окишев П.А., Петкевич А.А., Мистрюков А.А., Зятыкова Л.К., Миляева Л.С. Рельеф Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1988. 206 с.
19. Шарый П.А. Геоморфометрия в науках о земле и экологии, обзор методов и приложений // Известия Самарского научного центра РАН. 2006. № 8(2). С. 458–473.
20. Шарый П.А., Пинский Д.Л. Статистическая оценка связи пространственной изменчивости содержания органического углерода в серой лесной почве с плотностью, концентрациями металлов и рельефом // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1344–1356.
21. Шоба С.А., Алябина И.О., Колесникова В.М., Молчанов Э.Н., Рожков В.А., Столбовой В.С., Урусевская И.С., Шеремет Б.В., Конюшков Д.Е. Почвенные ресурсы России. Почвенно-географическая база данных. / Под ред. Г.В. Добровольского. М.: ГЕОС, 2010. 128 с.
22. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology // Hydrology Science Bulletin. 1979. V. 24(1). P. 43–69.
23. Boehner J., Selige T. Spatial Prediction of Soil Attributes Using Terrain Analysis and Climate Regionalisation // SAGA – Analysis and Modelling Applications. Goettinger Geographische Abhandlungen, 2006. V. 115. P. 13–27.
24. Brough D.M., Claridge J., Grundy M.J. Soil and landscape attributes: A report on the creation of a soil and landscape information system for Queensland. Brisbane, Australia: Natural Resources, Mines & Water, 2006. 80 p.
25. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Bohner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geosci. Model Dev. 2015. № 8. P. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
26. Desmet P., Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the ULSE LS factor on topographically complex landscape units // J. Soil Water Conserv. 1996. № 51. P. 427–433.
27. Finke P., Hartwich R., Dudal R., Ibanez J. et al. Georeferenced Soil Database for Europe. Manual of procedures. Version 1.1. European Soil Bureau, 2001. 178 p.
28. Florinsky I.V., Kuryakova G.A. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations – Exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale // Int. J. Geograph. Inf. Sci. 2000. V. 14. № 8. P. 815–832.
29. Guisan A., Weiss S.B., Weiss A.D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution // Plant Ecology. 1999. № 143. P. 107–122.
30. Holm S. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure // Scandinavian J. Statistics. 1979. V. 6. № 2. P. 65–70.
31. Jiang J., Zhu A. X., Qin C. Z., Zhu T., Liu J., Du F., Liu J., Zhang G., An Y. CyberSoLIM: A cyber platform for digital soil mapping // Geoderma. 2016. V. 263. P. 234–243.
32. Johnston R.M., Barry S.J., Bleyes E., Bui E.N., Moran C.J., Simon D.A.P., Carlile P., McKenzie N.J., Henderson B.L.,

- Chapman G., Imhoff M., Maschmedt D., Howe D., Grose C., Schoknecht N., Powell B., Grundy M.* ASRIS: The database // *Austral. J. Soil Res.* 2003. V. 41(6). P. 1021–1036. <https://doi.org/10.1071/SR02033>
33. *Lagacherie P., McBratney A.B.* Spatial soil information systems and spatial inference system: perspectives for digital soil mapping // *Digital Soil Mapping. An Introductory Perspective.* Netherlands: Elsevier, 2007. P. 3–25.
 34. *Lagacherie P., McBratney A., Voltz M.* Digital soil mapping: An introductory perspective. Amsterdam: Elsevier, 2006. 350 p.
 35. *McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B.* On digital soil mapping // *Geoderma.* 2003. V. 117. P. 3–52.
 36. *Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R.* Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications // *Hydrological Processes.* 1991. V. 5. № 1.
 37. *Olaya V.* A gentle introduction to SAGA GIS. 2004. 201 p.
 38. *Olaya V., Conrad O.* Geomorphometry in SAGA // *Geomorphometry: concepts, software, applications.* Elsevier, 2008. 765 p.
 39. OPENDEM. URL. <https://opendem.info/arc2meters.html> (дата обращения 30.10.2020)
 40. *Panagos P., Borrelli P., Meusburger K.* A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water // *Geosciences.* 2015. V. 5. P. 117–126.
 41. *Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L.* European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements // *Land Use Policy.* 2012. V. 29(2). P. 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003>
 42. *Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C.* Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agricultural Handbook. US Department of Agriculture: Washington, DC, 1997. № 703. 385 p.
 43. *Riley S.J., De Gloria S.D., Elliot R.* A Terrain Ruggedness that Quantifies Topographic Heterogeneity // *Intermountain J. Science.* 1999. V. 5. № 1–4. P. 23–27.
 44. Soil Science Division Staff. Soil survey manual / Eds.: C. Ditzler, K. Scheffe, H.C. Monger. USDA Handbook 18. Washington, D.C.: Government Printing Office, 2017.
 45. United States Geological Survey. URL. https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects (дата обращения 30.10.2020)
 46. *Van Engelen V.W.P., Batjes N.H., Dijkshoorn K., Huting J.* Harmonized Global Soil Resources Database (Final Report). Report 2005/06, FAO and ISRIC – World Soil Information, Wageningen. 17 p.
 47. *Weiss A.D.* Topographic Position and Landforms Analysis. 2000. Poster: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf
 48. *Weiss A.D.* Topographic Positions and Landforms Analysis (Conference Poster). ESRI International User Conference. San Diego, 2001. P. 9–13.
 49. *Wilson J.P., Gallant J.C.* Primary Topographic Attributes. Terrain Analysis: Principles and Applications. John Wiley & Sons, 2000. P. 51–85.
 50. *Wischmeier W.H., Smith D.D.* Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. Agricultural Handbook. US Department of Agriculture: Washington, DC, 1978. № 537. 60 p.

Using Soil-Geomorphological Database to Study the Spatial Variability of Humus, Physical Clay, and Clay Content in Soils of Kuznetsk-Salair Geomorphological Province

N. V. Gopp*

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

**e-mail: gopp@issa-siberia.ru*

Based on archive data on soils of the Kuznetsk-Salair geomorphological province (within the Novosibirsk oblast) and the results of processing digital elevation models, a soil-geomorphological database (SGDB) has been developed for collecting, storing and processing spatially distributed information. The SGDB comprises tables and related vector and raster cartographic data that contain information about the chemical and physical properties of soil horizons, morphometric parameters of relief (Height, Slope, Topographic Wetness Index, Slope Length and Steepness factor, Stream Power Index, Terrain Ruggedness Index, Topographic Position Index, etc.). The following soils are widespread in the study area: leached (Luvic Chernozems) and podzolized (Luvic Greyzemic Chernozems) chernozems; ordinary and podzolized meadow-chernozemic soils (Gleyic Chernozems and Greyzemic Gleyic Chernozems, respectively); light gray, gray and dark gray forest soils (Luvic Greyzemic Phaeozems); carbonate (Eutric Gleysols), podzolized (Haplic Gleysols) and solonchakous (Haplic Gleysols (Protosalic)) meadow soils; alluvial meadow soils (Eutric Fluvisols); meadow solonchak (Gleyic Solonetz). The analysis of the maps revealed a trend in increasing the content of humus, physical clay and clay in the upper soil horizon from the northeast to the southwest of the studied territory. A similar trend was observed for the Topographic Wetness Index. For the content of physical clay and clay in the parent material, the reverse trend has been established, i. e. an increase in the content of physical clay and clay from the southwest to the northeast has been noted. It was found that the soils of river valleys and plains, in comparison with the soils of the upper slopes and high ridges of hills, are characterized by a higher content of humus, physical clay and clay. Any significant relationships between morphometric parameters of relief and the content of humus, physical clay and clay in soils was not found.

Keywords: morphometric parameters of relief, mapping, LS-factor, SPI, TWI, TRI, TPI, SRTM, DEM