

УДК 630*113;630*5:551.4

АНАЛИЗ СВЯЗЕЙ СТРУКТУРЫ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСОВ С МОРФОМЕТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РЕЛЬЕФА НА ПРИМЕРЕ ЛАНДШАФТОВ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2020 г. А. С. Алексеев^а, Д. М. Черниковский^{а, *}^аСанкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, 194021 Россия

*E-mail: cherndm2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.07.2018 г.

После доработки 20.11.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

На примере двенадцати модельных участков, относящихся к одиннадцати ландшафтам Ленинградской области, продемонстрирован алгоритм определения взаимосвязей показателей структуры и продуктивности лесов с морфометрическими характеристиками рельефа. Исходными материалами для выполнения исследования служили геоинформационные базы данных лесоустройства, данные съемки ASTER GDEM и ландшафтные карты. Средствами географических информационных систем были сформированы наборы пространственных данных для модельных участков, построена регулярная сеть ячеек с шагом 1 км, определены обобщенные значения показателей структуры и продуктивности лесов (средние запасы, классы бонитета, коэффициенты преобладающей породы, доли площади групп типов леса и преобладающих пород). Автоматическая классификация рельефа данных глобальной цифровой модели высот ASTER выполнялась методом Ивахаши и Пайка. В процессе классификации каждый пиксел модели высот относился к одному из восьми классов на основе рассчитанных значений морфометрических характеристик рельефа – крутизна склона, текстуры и выпуклости склонов. С помощью анализа главных компонент выделен набор классов форм, объясняющих большую часть изменчивости рельефа модельных участков. Средствами рангового корреляционного анализа установлено наличие связей между представленностью выявленного набора классов форм рельефа и отдельными показателями структуры и продуктивности лесов. Дано возможное объяснение характера влияния рельефа на формирование условий лесных местопроизрастаний. Морфометрические характеристики, используемые при классификации – крутизна склонов, текстура и выпуклость, могут определять условия дренажа лесных местопроизрастаний и, как следствие, влиять на изменение показателей структуры и продуктивности лесов. Установлены регрессионные зависимости между классами форм рельефа и показателями структуры и продуктивности лесов для разных масштабных уровней и различных ландшафтов Ленинградской области. Полученные результаты позволяют положительно оценивать перспективы дальнейших исследований в данном направлении и рассматривать методы геоморфометрии в числе потенциальных инструментов лесоучетных работ.

Ключевые слова: морфометрические характеристики рельефа, автоматическая классификация форм рельефа, цифровая модель рельефа, структура и продуктивность лесов, ландшафт, регрессионный анализ.

DOI: 10.31857/S0024114820020035

Теоретические основы возможного применения принципов ландшафтного подхода в лесном хозяйстве отражены в ряде публикаций (Громцев, 1993; Общие принципы ..., 1994; Исаченко, 1998; Исаченко и др., 1999; Киреев, 2007; Громцев, 2017). Но практическое применение ландшафтного подхода, например, для решения задач лесоустройства или государственной инвентаризации лесов, представляется в настоящий момент методически сложным, трудновыполнимым и достаточно дорогостоящим. Создание ландшафтных карт (основы для планирования) требует привле-

чения высококвалифицированных специалистов разных направлений. Также для создания ландшафтных карт необходимо наличие набора пространственных данных (баз данных, материалов дистанционного зондирования и материалов полевых изысканий). Даже использование готовых ландшафтных карт не является тривиальной задачей. К недостаткам многочисленных ландшафтных разработок, выполненных на территории СССР, относятся их научно-исследовательский, учебно-педагогический характер, отсутствие статуса государственных документов. Отдельные

ландшафтные карты часто выполнялись с применением различных таксономических принципов, в разных масштабах (Скалабан, 2009).

Одним из важных вопросов, связанных с изучением и описанием ландшафтов, является характеристика формы поверхности рельефа. Традиционный (качественный) подход к выделению форм рельефа, основанный на визуальном анализе рисунка горизонталей топографических карт, достаточно субъективен (Колбовский, 2006; Шарый, 2006). «Неколичественные методы описания рельефа (деление рельефа на “волнистый”, “слабоволнистый”, “бугристый” и т.п.) уже исчерпали себя, не будучи в состоянии ни дать новые содержательные ответы на вопросы о видах механизмов влияния рельефа на перераспределение влаги, тепла и т.д., ни ввести объективные классификации форм рельефа, ни дать методы обнаружения статистически достоверных связей между характеристиками рельефа и изучаемых компонент ландшафта” (Шарый, 2006).

Современные материалы дистанционного зондирования и алгоритмы их обработки позволяют значительно упростить процесс моделирования рельефа, а также использовать для его описания количественные (морфометрические) характеристики. В последние десятилетия активно развиваются количественные методы изучения поверхности рельефа в рамках геоморфометрии¹. Представление о предмете изучения, базовых математических основах, современном состоянии и перспективах развития геоморфометрии можно получить из ряда обзорных работ (Шарый, 2006; Hengl, Reuter, 2008; Флоринский, 2016). Алгоритмы расчета основных морфометрических величин, используемые в ГИС, приводятся в ряде публикаций (Zevenbergen, Thorne, 1987; Шарый, 2006; Wilson et al., 2007; Hengl, Reuter, 2008; Нетребин, 2012; Флоринский, 2016; Основные ..., 2013). Одним из источников данных о рельефе являются глобальные цифровые модели высот (ЦМВ) свободного доступа, получаемые на основе радарных съемок (Карионов, 2010; Соколов и др., 2010; Фарбер и др., 2013; Глобальные ..., 2015).

В отдельных публикациях представлены результаты исследований, связанных с выявлением и оценкой взаимосвязей морфометрических характеристик рельефа с характеристиками лесов (Алексеев, Черниховский, 2001; Черниховский,

2002; Черниховский, Алексеев, 2003; Данилова и др., 2010; Алексеев, Никифоров, 2014; Черниховский, 2016, 2017, 2017а, 2018;). В.В. Сысуев и П.А. Шарый предложили метод выделения потенциальных типов условий местопроизрастания на основе морфометрического анализа рельефа (Сысуев, Шарый, 2000). П.А. Шарый на примере модельного участка лесной экосистемы на юге Московской области выявил тесную связь распределения зон аккумуляции с рельефом путем анализа ряда морфометрических величин. Зоны аккумуляции определяли резкие изменения характеристик почв и растительности лесной экосистемы (Шарый, 2016). На примере тропических лесов проведено исследование количественного влияния характеристик рельефа на структуру, состав и функции лесных ландшафтов с применением метода регрессионного анализа и метода главных компонент (Jucker, Bongalov и др., 2018).

На примере модельных участков, расположенных в Ленинградской области, получен набор многофакторных регрессионных уравнений характеристик лесов (зависимых переменных) на основе морфометрических характеристик рельефа (независимых переменных). В качестве морфометрических характеристик могут служить классы форм рельефа, полученные на основе классификации данных радарной съемки SRTM или топографических карт (Черниховский, 2018). Наличие подобных зависимостей указывает на перспективность дальнейшего изучения возможностей цифрового моделирования рельефа для изучения лесов. Представляет интерес выявление и анализ количественных взаимосвязей характеристик лесов с характеристиками рельефа для участков, относящихся к разным ландшафтам.

Задачами исследования являлись:

- формирование ЦМВ отдельного региона на основе глобальных ЦМВ;
- автоматическая классификация форм поверхности рельефа на основе морфометрических величин;
- выбор модельных участков, относящихся к разным ландшафтам, и определение для них обобщенных показателей структуры и продуктивности лесов;
- выявление и интерпретация взаимосвязей характеристик рельефа с показателями структуры и продуктивности лесов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Объекты исследования (модельные участки) расположены на территории Ленинградской области, характеризующейся значительной долей земель, покрытых лесной растительностью и представленностью разных видов ландшафтов. Выбор

¹ Геоморфометрия (цифровое моделирование рельефа) как новое направление в фотограмметрии возникло в середине 50-х гг. прошлого века. Предметом геоморфометрии является математическое моделирование и анализ рельефа, а также взаимосвязей между ним и другими компонентами геосистем. В настоящее время геоморфометрия широко используется для решения задач геоморфологии, гидрологии, почвоведения, геоботаники, геологии, гляциологии, океанологии, климатологии и других наук о Земле (Флоринский, 2016).



Рис. 1. Расположение модельных участков на карте Ленинградской области. ■ — модельные участки, ①—⑫ — номера модельных участков

модельных участков определялся следующими критериями:

- представленностью характерных для Ленинградской области видовых групп ландшафтов;
- желательным наличием нескольких участков каждой видовой группы ландшафтов для сравнения результатов моделирования;
- преобладанием на территории участков земель лесного фонда, а среди них — земель покрытых лесной растительностью.

На основе ландшафтной карты Ленинградской области (Исаченко, 1994; Ландшафтная карта, 2018) выбрано 12 модельных участков разной величины, относящихся к 11 видам ландшафтов. Перечень выбранных участков, их форма и размеры, принадлежность к ландшафтам и лесничествам представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Выбранные участки относятся к ландшафтам бореального (таежного) умеренно-климатического типа, среднетаёжного и южнотаёжного подтипов, равнинному классу, с подклассами низменных и возвышенных ландшафтов (Исаченко, 1994).

Исходными материалами для выполнения исследования служили геоинформационные базы данных лесоустройства, данные съемки ASTER GDEM и ландшафтные карты. Средствами ГИС были сформированы наборы пространственных данных для модельных участков, построена регулярная сеть ячеек с шагом 1 км, определены обобщенные значения лесотаксационных характери-

стик для ячеек (средние запасы, классы бонитета, коэффициенты преобладающей породы, доли площади основных групп типов леса и основных преобладающих пород). Из дальнейшего анализа исключались “неполные” ячейки (в которых доля земель лесного фонда составляла менее 95% от общей площади), а также ячейки в которых доля земель, покрытых лесной растительностью, составляла менее 90% от общей площади.

Автоматическая классификация рельефа данных глобальной цифровой модели высот ASTER выполнялась с помощью программы Saga GIS (Conrad at al., 2015) методом Ивахаши и Пайка (Iwahashi, Pike, 2007; Hengl, Reuter, 2008; Hrvatin, Perko, 2012). Данный алгоритм подразумевает расчет на основе исходной матрицы высот трех морфометрических характеристик рельефа — крутизны склона, текстуры и выпуклости склонов с последующим отнесением каждого пиксела модели высот к одному из классов. К преимуществам данной классификации относятся возможность применения для любого ландшафта, адаптация к цифровым моделям рельефа любого пространственного разрешения, вычислительная эффективность, и возможность применения результатов для геоморфологической интерпретации. Классификация Ивахаши и Пайка используется исследователями для изучения рельефа территорий, совершенствования и сравнения различных методик классификации (Hrvatin, Perko, 2012; Zwoliński, Gudowicz, 2015).

Таблица 1. Принадлежность модельных участков к ландшафтам и лесничествам Ленинградской области

Номер модельного участка	Название ландшафта*	Видовая группа ландшафтов	Название лесничеств и участковых лесничеств
1	Лужско-Оредежский	Низменные и повышенные моренные заболоченные на бескарбонатных валунных суглинках	Волосовское (Верестское, Хотнежское, Изварское), Лужское (Низовское), Гатчинское (Рылеевское)
2	Лужско-Оредежский	Низменные и повышенные моренные заболоченные на бескарбонатных валунных суглинках	Учебно-опытное (Перинское, Лисинское, Кастенское)
3	Пашско-Сясьский	Низменные и повышенные моренные заболоченные на бескарбонатных валунных суглинках	Волховское (Хваловское, Мыслинское), Тихвинское (Черенцовское)
4	Свирско-Олонецкий	Низменные и повышенные моренные заболоченные на бескарбонатных валунных суглинках	Лодейнопольское (Мандрогское, Кондушское, Свирское сельское, Свирское)
5	Нижнесвирский	Низменные озерно-ледниковые заболоченные песчаные	Лодейнопольское (Мандрогское, Кондушское, Свирское сельское, Свирское, Шоткусское, Люговское, Лодейнопольское)
6	Свирско-Оятский	Возвышенные холмисто-моренные на бескарбонатных коренных породах	Лодейнопольское (Свирское сельское, Лодейнопольское, Люговское, Шапшинское, Алеховщинское, Алеховщинское сельское, Тененское)
7	Южное Приладожье	Низменные озерно-ледниковые заболоченные песчаные	Лодейнопольское (Шоткусское, Доможировское, Свирское сельское, Яровщинское)
8	Среднеоятский	Низменно-возвышенные камовые и озерно-ледниковые песчаные	Лодейнопольское (Шапшинское, Яровщинское, Алеховщинское, Ребовское, Пирозерское, Алеховщинское сельское, Тервеничское)
9	Капшинский	Возвышенные холмисто-моренные на бескарбонатных коренных породах	Лодейнопольское (Тервеничское, Пирозерское, Ребовское)
10	Тихвинский	Низменные озерно-ледниковые заболоченные песчаные	Тихвинское (Березовское, Шомушское), Бокситогорское (Большедворское, Михайловское)
11	Тихвинская гряда	Возвышенные холмисто-моренные на карбонатном известняковом цоколе	Бокситогорское (Михайловское, Деревское, Новодеревенское, Борское, Бокситогорское, Пикалевское, Самойловское, Озеревское, Мозолевское, Раменское, Анисимовское)
12	Судско-Чагодский	Низменные озерно-ледниковые заболоченные песчаные	Бокситогорское (Михайловское, Деревское, Новодеревенское, Борское, Бокситогорское, Пикалевское, Самойловское, Озеревское, Мозолевское, Раменское, Анисимовское)

* Названия и видовые группы ландшафтов указаны в соответствии с картой ландшафтов Ленинградской области (Исаченко, 1994).

Для выявления наиболее значимых классов форм рельефа по результатам классификации моделей высот использовался метод главных компонент. Наличие связи между набором классов форм рельефа и отдельными характеристиками лесов оценивалось с помощью рангового корреляционного анализа – коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Связи между классами форм рельефа и характеристиками лесов также оценивались средствами многофакторного регрессионного анализа. Для проведения статистических расчетов использовались программы MS Excel и Statgraphics (Statgraphics ..., 2010).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 приведены характеристики лесов и классы форм рельефа модельных участков.

На рис. 2 показаны этапы и результаты автоматической классификации рельефа Ленинградской области, выполненной согласно алгоритму Ивахаши и Пайка.

Анализ главных компонент распределения площади выбранных участков по классам форм рельефа (рис. 3, табл. 3) показал, что две первые

компоненты могут объяснять 89.47% общей изменчивости.

Максимальные значения статистических нагрузок (весов) по первой главной компоненте имеют классы форм рельефа 1 и 6, по второй главной компоненте – классы 7 и 3 (табл. 4).

Оценена ранговая корреляция характеристик лесов с выявленными в результате анализа главных компонент классами форм рельефа (табл. 5). Наличие достоверных коэффициентов ранговой корреляции указывает на возможное существование связей между условиями местопроизрастания (определяемыми, в частности, рельефом) и отдельными характеристиками лесов. Характеристики лесов, с которыми установлены корреляции, отражают продуктивность и производительность насаждений (средний запас на 1 га, средний бонитет), а также представленность наиболее богатых в данном регионе условий местопроизрастания (доля лесов кисличной группы типов леса).

Одним из подходов к классификации лесных местопроизрастаний на основе форм рельефа является сформулированное А.Г. Исаченко представление о ландшафтных типах лесных местопроизрастаний (ЛТЛМ) на примере ландшафтов южной тайги Северо-Западного региона. Под

Таблица 2. Характеристики лесов и рельефа модельных участков

Характеристики участков	Номер модельного участка											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Число ячеек регулярной сети, шт.	319	99	119	178	368	552	145	589	186	212	562	862
Характеристика лесов												
Средний запас на 1 га, м ³	147	201	152	183	168	163	152	182	200	154	191	166
Средний класс бонитета	2.7	2.6	2.6	2.4	2.8	2.5	3.3	2.6	2.2	3	2.5	2.9
Средний коэффициент преобладающей породы в составе, ед.	5.3	5.8	6.1	6.1	6.4	5.5	7.7	6	6.1	7.1	5.9	6.3
Доля площади												
сосновых насаждений	0.17	0.3	0.17	0.2	0.4	0.11	0.77	0.37	0.05	0.55	0.15	0.4
еловых насаждений	0.33	0.37	0.13	0.41	0.28	0.51	0.08	0.32	0.4	0.18	0.26	0.24
березовых насаждений	0.37	0.23	0.48	0.28	0.23	0.27	0.14	0.24	0.4	0.22	0.37	0.29
черничной группы типов леса	0.38	0.47	0.19	0.56	0.53	0.62	0.42	0.56	0.52	0.49	0.47	0.4
кисличной группы типов леса	0.23	0.27	0.35	0.3	0.14	0.26	0.02	0.21	0.39	0.08	0.35	0.19
Класс форм рельефа												
1	10.03	15.87	14.24	12.02	8.91	16.62	8.52	30.13	48.91	43.68	56.73	23.33
2	7.23	11.37	12	16.46	14.09	14.83	8.64	8.06	2.49	1.38	0.2	4.47
3	2.98	1.16	1.2	1.18	2.57	3.93	6.22	5.7	10.15	4.17	7.62	7.17
4	7.29	2.69	4.15	4.74	5.59	3.59	7.69	2.18	0.82	0.49	0.09	3.35
5	13.83	23.14	20.55	15.49	13.13	21.38	14.03	27.54	25	41.31	30.15	27.77
6	25.64	33.83	33.82	35.47	34.57	27.46	22.75	15.09	4.9	2.8	0.4	12.76
7	4.75	2.98	2.41	1.8	4.5	4.8	10.9	6.18	5.53	4.95	4.58	9.68
8	28.25	8.96	11.63	12.84	16.64	7.39	21.25	5.12	2.2	1.22	0.23	11.47

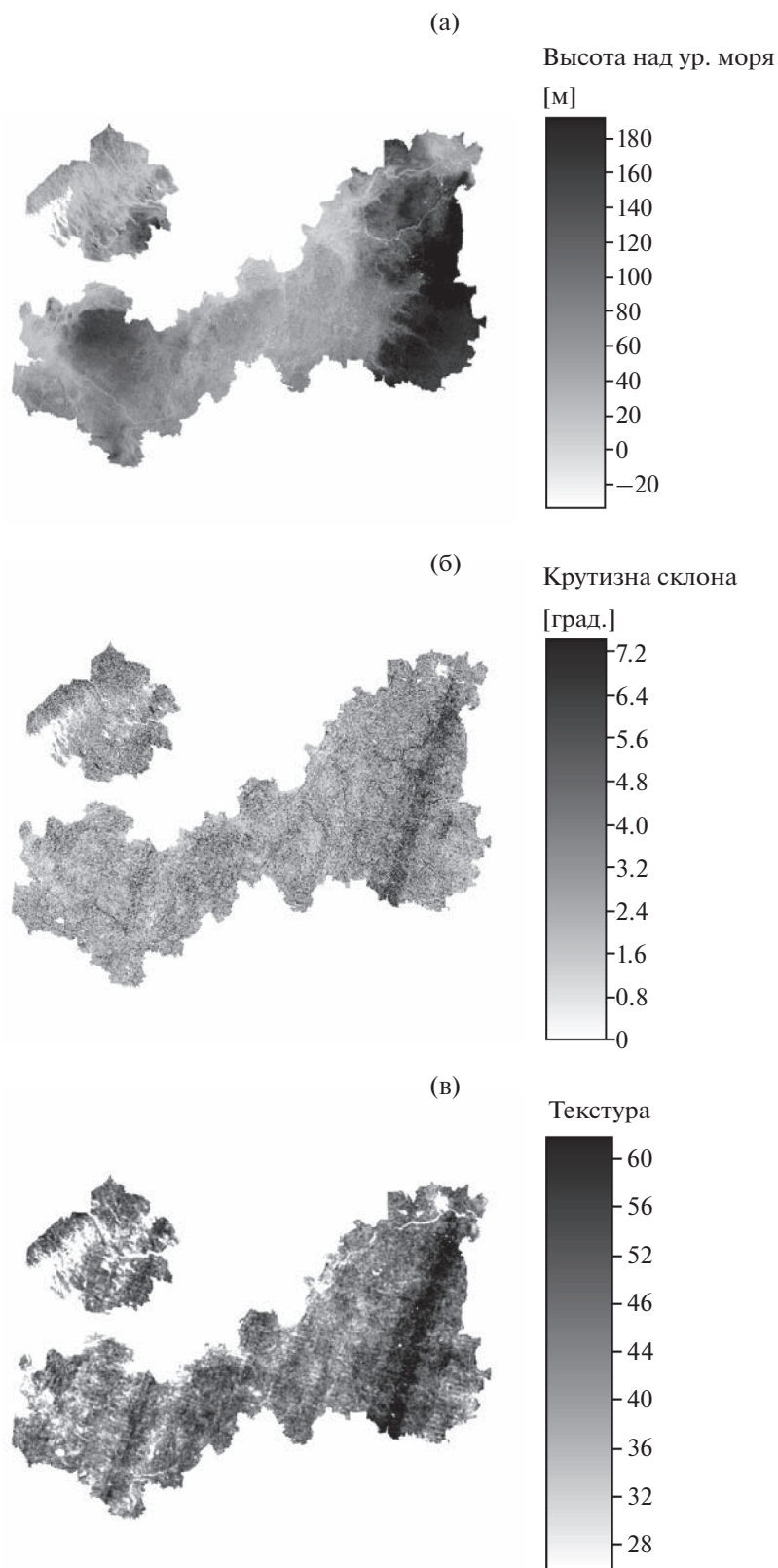


Рис. 2. Этапы автоматической классификации рельефа: (а) – цифровая модель высот Ленинградской области на основе матрицы ASTER GDEM с обозначением высот над уровнем моря, м; (б) – крутизна склонов, °; (в) – текстура; (г) – выпуклость; (д–м) – результаты классификации форм рельефа по алгоритму Ивахаши и Пайка.

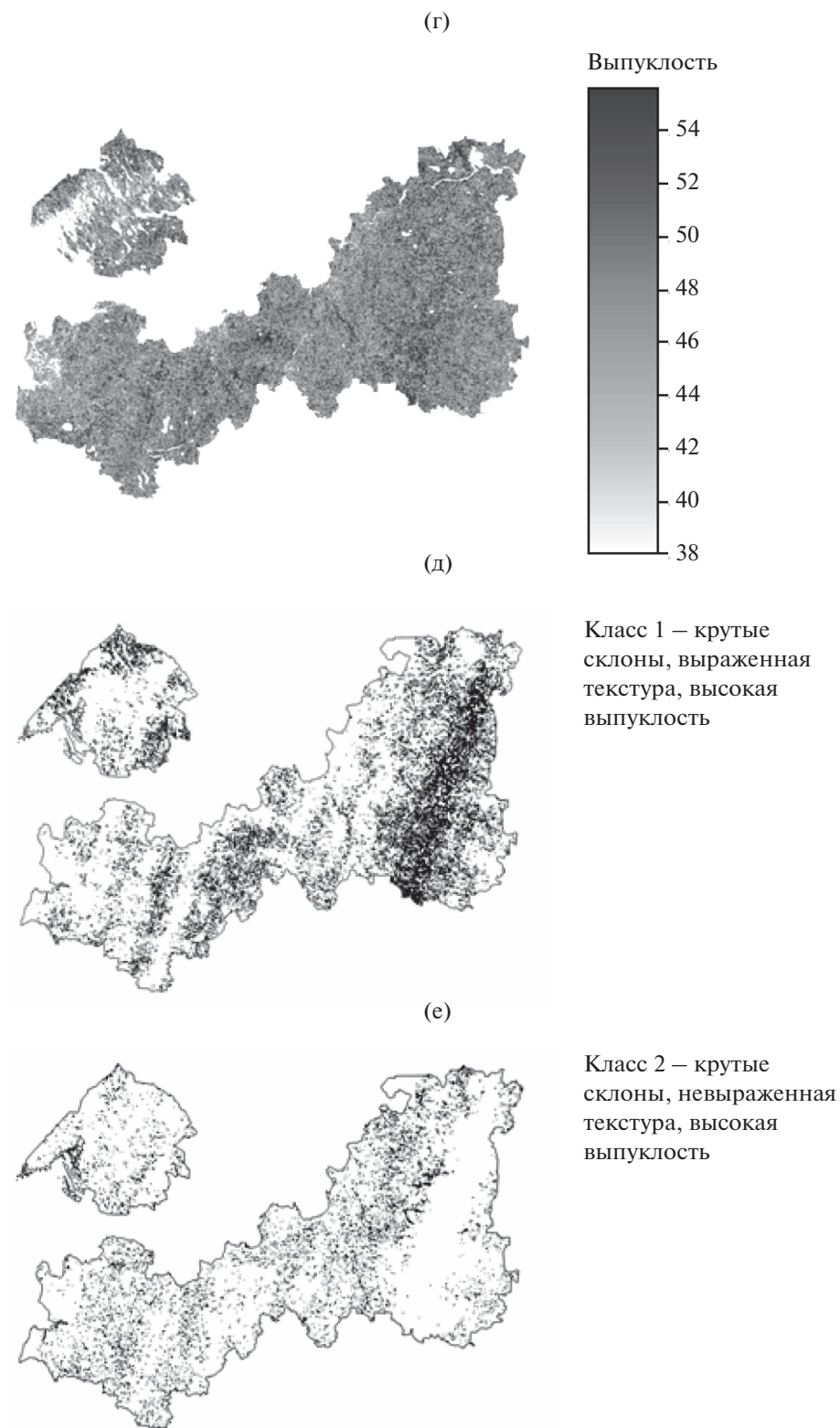


Рис. 2. Продолжение.

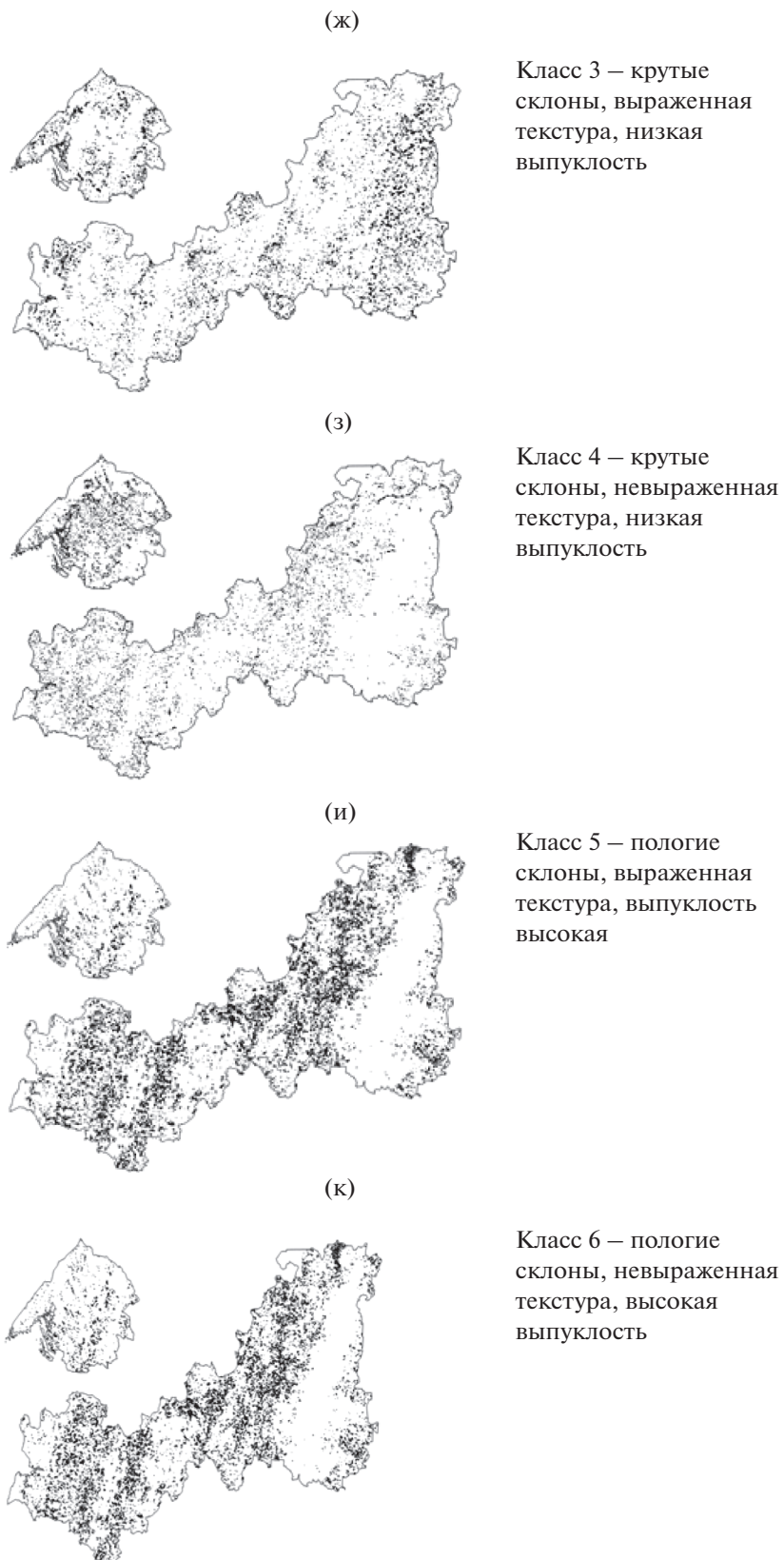


Рис. 2. Продолжение.

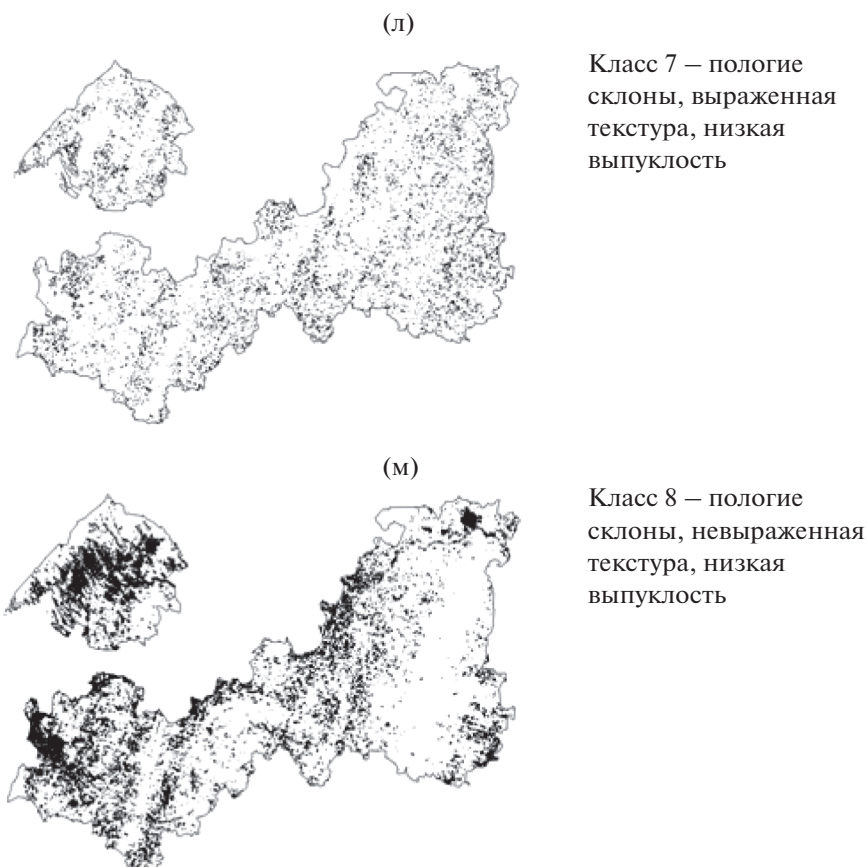


Рис. 2. Окончание.

ЛТЛМ понимаются крупные морфологические части ландшафта, рассматриваемые как локальные сочетания лесорастительных условий, которым соответствуют устойчивые типы лесных массивов (Исаченко, 1998; Исаченко и др., 2000). Основными критериями классификации ЛТЛМ являются формы мезорельефа и минеральный субстрат (материнские породы). Каждому ландшафту присущ сопряженный ряд ЛТЛМ. Для условий Северо-Запада А.Г. Исаченко выделяет два обобщенных ряда ЛТЛМ. Первый — ландшафты с расчлененным рельефом, холмисто-котловиной или грядово-ложбинной структурой (в настоящем исследовании доля таких участков около 45%). В таких ЛТЛМ происходит гравитационное перераспределение атмосферной влаги по профилю рельефа, наиболее сухие местопрорастания располагаются в верхней части, избыточно увлажненные — в нижней части. Второй ряд — ландшафты с плоским рельефом и слабым естественным дренажем (в настоящем исследовании доля таких участков около 55%). Для таких ландшафтов определяющим водный режим фактором служит уровень грунтовых вод. Возвышенные участки в центре междуречий занимают вер-

ховые болота. Вдоль рек располагаются относительно дренированные ЛТЛМ.

Важно представлять вклад в результаты классификации рельефа отдельных морфометрических величин — крутизны склонов, текстуры и выпуклости. Крутизна склонов в равнинных условиях Ленинградской области, определяемая

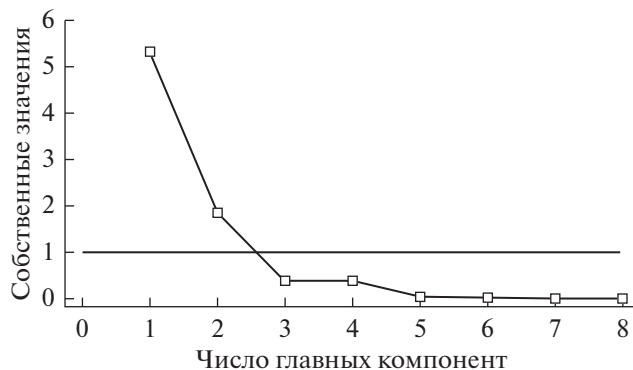


Рис. 3. График собственных значений главных компонент распределения площадей по классам форм рельефа.

Таблица 3. Результаты анализа главных компонент

Число главных компонент	Собственное значение	Доля изменчивости, %	Накопленный процент, %
1	5.3245	66.557	66.56
2	1.8332	22.915	89.47
3	0.3984	4.980	94.45
4	0.3797	4.746	99.20
5	0.0387	0.483	99.68
6	0.0205	0.257	99.94
7	0.005	0.062	100
8	4.1526×10^{-16}	0.000	100

по ЦМБ SRTM, не всегда объективно отражает реальные изменения рельефа. С учетом известных из литературы сведений о модели SRTM (Kellndorfer et al., 2004; Hengl, Reuter, 2008; Gallant et al., 2012; Черниковский, 2018) можно заключить, что модель высот SRTM отражает волнистую поверхность, проходящую ниже поверхности лесного полога и близкую к модели рельефа на открытых местах. Покрытые лесом равнинные участки теоретически должны представлять собой преимущественно террасообразные плоские возвышения. Но результаты классификации местами представляют достаточно пеструю картину. Переходы между покрытыми и не покрытыми лесной растительностью участками (лесами и болотами, вырубками, пашнями) могут иметь резкие скачки высот, которые при классификации рельефа идентифицируются как крутые склоны. Малозначительные с позиции таксации лесов различия в характеристике лесного полога могут приводить к выделению нескольких клас-

сов склонов даже в пределах одного лесотаксационного выдела. К таким различиям относятся перепады высот, неравномерная полнота и состав насаждений, наличие линейных объектов (дорог, просек, линий электропередач) и открытых участков. В целях снижения эффекта “крутых склонов” для классификации рельефа размер пиксела исходной модели SRTM был увеличен до 90 м.

Текстура рельефа (“шероховатость”) характеризует плотность долин и гребней. При использовании классификации Ивахаши и Пайка текстура рассчитывается путем выделения и подсчета отдельных ячеек ЦМБ с высокими и низкими значениями (“ям” и “пиков”) внутри скользящего окна фиксированного размера. Невыраженная текстура характеризует участки с плоскими склонами. Крутизны склонов и текстуры поверхности достаточно для классификации объектов “грубой” топографии. Но для разделения слабо выраженных плоских элементов рельефа, например, пойменных террас, этих показателей недостаточно – в качестве третьей морфометрической величины при классификации используется локальная выпуклость. Отмечается, что низкие значения выпуклости характерны для широких речных долин и подножий гор, высокие – для плоских поверхностей со слабовыраженным рельефом, например, речных террас (Iwahashi, Pike, 2007).

С учетом того, что при обработке исключались ячейки регулярной сети с долей площади нелесных земель более 10%, крупные болота, занимающие значительные площади некоторых модельных участков, в расчетах фактически не учитывались. Поэтому представленность площади классов форм рельефа рельефа 1, 6, 7 в составе изучаемых участков можно интерпретировать как общее улучшение условий местопроизрастания для насаждений за счет улучшения условий дренажа, что особенно важно для ландшафтов Ленинградской области, относящихся к зоне избыточного увлажнения. Класс 1 характеризуется крутыми склонами, выраженной тек-

Таблица 4. Статистические нагрузки (вес) главных компонент

Класс форм рельефа	Статистические нагрузки (вес) главных компонент	
	компонента 1	компонента 2
1	0.4185*	-0.0878
2	-0.3734	-0.2425
3	0.3195	0.4149*
4	-0.3780	0.3412
5	0.3758	-0.1818
6	-0.4113*	-0.191
7	0.0844	0.6706*
8	-0.3505	0.3544

* Жирным шрифтом выделены максимальные значения статистических нагрузок главных компонент.

Таблица 5. Результаты рангового корреляционного анализа характеристик лесов модельных участков с классами форм рельефа 1, 6, 7

Характеристика лесов	Расчетный коэффициент ранговой корреляции	Критическое значение коэффициента ранговой корреляции (уровень значимости)	
		0.05	0.10
Средний запас на 1 га, м ³	0.6993	0.576	0.497
Средний класс бонитета	0.5315	0.576	0.497
Доля кисличной группы типов леса	0.6014	0.576	0.497

Таблица 6. Многофакторные регрессионные уравнения связей количественных и качественных характеристик лесов с результатами автоматической классификации форм рельефа Ивахаши и Пайка

Числовая и качественная характеристика лесов	Регрессионное уравнение	Коэффициент детерминации R ² , %
Средний запас на 1 га, м ³	$\bar{M} = 3.5444C_1 + 4.0653C_6$	98.81
Средний класс бонитета	$\bar{B} = 0.0879C_1 + 0.1173C_6$	96.17
Средний коэффициент преобладающей породы в составе	$\overline{\text{Coeff}} = 0.1207C_1 + 0.1504C_6$	95.46
Доля площади еловых насаждений	$S_{\text{spruce}} = 0.0055C_1 + 0.0077C_6$	87.17
березовых насаждений	$S_{\text{birch}} = 0.0063C_1 + 0.0068C_6$	92.37
черничной группы типов леса	$S_{\text{chern}} = 0.0096C_1 + 0.011C_6$	93.45
кисличной группы типов леса	$S_{\text{kisl}} = 0.0053C_1 + 0.0053C_6$	88.12

Примечание. Доля площади модельных участков от покрытой лесной растительностью площади, %: S_{chern} – черничная группа типов леса, S_{kisl} – кисличная группа типов леса, S_{spruce} – еловые насаждения, S_{birch} – березовые насаждения. Средние значения таксационных характеристик насаждений: \bar{M} – запас на га, м³, \bar{B} – класс бонитета, $\overline{\text{Coeff}}$ – доля (коэффициент) преобладающей породы в составе. Площадь (%) классов форм поверхности рельефа по классификации Ивахаши и Пайка: C_1 – класс 1, C_6 – класс 6.

стурой и высокой выпуклостью, класс 6 – пологими склонами, невыраженной текстурой и высокой выпуклостью, класс 7 – пологими склонами, выраженной текстурой и низкой выпуклостью. Можно предположить, что низкая выпуклость рельефа (класс 7) может компенсироваться выраженной текстурой (чередованием выпуклых и вогнутых элементов – “гребней”, “ям”, элементов гидрографической сети).

В табл. 6 показаны результаты регрессионного анализа связей количественных и качественных характеристик лесов с результатами автоматической классификации.

Ранее были установлены аналогичные показанным в табл. 4 многофакторные регрессионные зависимости между характеристиками лесов и классами форм рельефа для одного из модельных участков – Лисинского учебно-опытного лесхоза (Черниховский, 2017а и 2018). Примечательно, что регрессионные уравнения установлены для

разных масштабных уровней. Так, регрессионные уравнения были установлены для ячеек регулярной сети с шагом 1 км. В настоящем исследовании аналогичные уравнения получены для модельных участков площадью 99–862 км². Существование однородных регрессионных зависимостей показателей структуры и продуктивности лесов от классов форм рельефа на разных масштабных уровнях (урочища, местности и ландшафты) позволяет сделать предположение о близости механизма влияния формы поверхности рельефа на характеристики структуры и продуктивности лесов в данных условиях.

В настоящем исследовании модельные участки относятся к ландшафтам восьми ландшафтных групп, отличающихся характером рельефа, зональной принадлежностью и подстилающими породами. Тем не менее наличие статистических связей между показателями структуры и продуктивности лесов с классами форм рельефа указы-

вает на возможное существование общего для разных ландшафтов характера влияния рельефа на лесной растительный покров.

Наличие регрессионных связей между классами форм рельефа и показателями структуры и продуктивности лесов для разных масштабных уровней и разных ландшафтов Ленинградской области позволяет положительно оценивать перспективы дальнейших исследований в данном направлении. Методы и средства геоморфометрии, основанные на числовой оценке характеристик рельефа с использованием ЦМВ, могут войти в число современных инструментов лесоучетных работ наряду с геоинформационными системами и дистанционными методами.

Выводы. 1. Для двенадцати модельных участков, относящихся к одиннадцати ландшафтам разных видовых групп Ленинградской области, установлено, что изменчивость рельефа участков может характеризоваться ограниченным набором классов форм, определяемых по результатам анализа главных компонент.

2. Рост представленности по площади выделенного по результатам анализа главных компонент набора классов форм рельефа отражается на изменении показателей продуктивности и производительности лесов (среднего запаса, среднего класса бонитета, доли площади лесов кисличной группы). Можно предположить, что выбранные классы форм рельефа способны определять условия местопроизрастания. Морфометрические величины, на основе которых выполняется классификация Ивахаши и Пайка (крутизна склонов, текстура, выпуклость), при близости иных условий формирования лесных местопроизрастаний определяют условия дренажа и способны замещать друг друга с формированием однородного лесорастительного эффекта.

3. Использование при регрессионном анализе в качестве независимых переменных классов форм рельефа с наибольшими статистическими нагрузками (весами) позволило получить значимые регрессионные уравнения для большинства анализируемых показателей структуры и продуктивности лесов.

4. Предполагается, что аналогичные количественные связи показателей структуры и продуктивности лесов с классами форм рельефа могут существовать на разных масштабных уровнях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.С., Никифоров А.А. Влияние рельефа на структуру и продуктивность лесных ландшафтов с применением 3D-моделирования на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза // *Лесоведение*. 2014. № 5. С. 42–53.

Алексеев А.С., Черниковский Д.М. Структура и продуктивность лесов в связи с формами рельефа Карельского перешейка // *Лесоведение*. 2001. № 3. С. 23–30.

Глобальные цифровые модели высот. 2015. URL: http://www.racurs.ru/wiki/index.php/Глобальные_цифровые_модели_высот (Дата обращения 16.06.18).

Громцев А.Н. Ландшафтные закономерности структуры и динамики среднетаежных сосновых лесов Карелии. Петрозаводск: Изд-во Карельский НЦ РАН, 1993. 160 с.

Громцев А.Н. Обзор результатов фундаментальных и прикладных исследований европейских таежных лесов России на ландшафтной основе // *Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития*: Сб. статей. Тюмень; Тобольск: Изд-во Тюменского государственного университета, 2017. С. 33–38.

Данилова И.В., Рыжкова В.А., Корец М.А. Алгоритм автоматизированного картографирования современного состояния и динамики лесов на основе ГИС // *Вестник НГУ. Серия “Информационные технологии”*. 2010. Т. 8. Вып. 4. С. 15–24.

Исаченко А.Г. Ландшафтное районирование и типология ландшафтов Ленинградской области // *Общие принципы стратегии лесопользования и лесовыращивания на ландшафтно-типологической основе*: Сб. науч. тр. СПбНИИ лесного хозяйства. СПб.: Изд-во СПбНИИЛХ, 1994. С. 11–25.

Исаченко А.Г. Ландшафтные типы лесных местопроизрастаний: определение, классификация, картографирование, характеристика // *Устойчивое лесопользование и критерии его оценки в период перехода к рыночной экономике*: Сб. науч. тр. СПбНИИ лесного хозяйства. СПб.: СПбНИИЛХ, 1998. С. 161–183.

Исаченко А.Г., Книзе А.А., Романюк Б.Д. Ландшафтоведение и актуальные проблемы лесопользования // *Известия Русского географического общества*. 1999. Т. 131. № 3. С. 17–23.

Исаченко А.А., Книзе А.А., Романюк Б.Д. Экологические функции леса в южных ландшафтах Северо-Запада // *Известия Русского географического общества*. 2000. Т. 132. № 1. С. 3–12.

Карионов Ю.И. Оценка точности матрицы SRTM // *Геопрофи*. 2010. № 1. С. 48–51.

Киреев Д.М. Лесное ландшафтоведение. СПб.: СПб лесотехническая академия, 2007. 540 с.

Колбовский Е.Ю. Ландшафтоведение. М.: Академия, 2006. 480 с.

Ландшафтная карта Ленинградской области. Масштаб 1 : 1500000 // База знаний: карты. Институт геоэкологии РАН URL: <http://hge.spbu.ru/mapgis/subekt/spb/landshaft.pdf> (Дата обращения 16.06.2018)

Нетребин П.Б. Морфометрический анализ рельефа Большого Кавказа: Автореф. дис. ... канд. географ. наук (спец. 25.00.25). Краснодар: Краснодарский государственный университет, 2012. 23 с.

Общие принципы стратегии лесопользования и лесовыращивания на ландшафтно-типологической основе: Сб. научн. тр. Отв. редактор Бельков В.П. СПб.: СПбНИИ лесного хозяйства, 1994. 134 с.

- Основные геоморфометрические параметры: теория, 2013 // *GisLAB. Географические информационные системы и дистанционное зондирование*. URL: <http://gislab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html> (Дата обращения 16.06.18)
- Скалабан В.Д.* Ландшафтная дифференциация территорий как природно-генетическая основа адаптивного землепользования // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2009. Т. 64. С. 12–22.
- Соколов Л.А., Лобанов Г.В., Полякова А.В.* Использование возможностей модели SRTM (Shuttle Radar Satellite Mission) в анализе рельефа как фактора почвообразования (на примере Брянского лесного массива) // *Вестник Брянского гос. университета*. 2010. № 4. С. 237–243.
- Сысуев В.В., Шарый П.А.* Выделение типов условий местопроизрастания для лесостроительства по участковому методу // *Лесоведение*. 2000. № 5. С. 10–19.
- Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Брюханов Н.В.* Перспективы использования данных SRTM для решения лесных научно-практических задач // *ГЕО-Сибирь-2013: Сб. матер. IX Междунар. науч. конгр. (15–26 апреля 2013 г.)*. Новосибирск: Сибирская гос. геодезическая академия. 2013. Т. 4. С. 85–88.
- Флоринский И.В.* Иллюстрированное введение в геоморфометрию // *Электронное научное издание Альманах “Пространство и Время”*. 2016. Т. 11. Вып. 1: Система планета Земля. Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-arprovr_e-ast11-1.2016.71 (Дата обращения 16.06.2018)
- Черниковский Д.М.* Анализ влияния количественных характеристик поверхности рельефа на структуру лесного растительного покрова разных регионов // *Известия лесотехнической академии*. 2002. Вып. 10(168). С. 67–75.
- Черниковский Д.М., Алексеев А.С.* Влияние формы поверхности рельефа на структуру и продуктивность лесных ландшафтов на примере заповедника “Верхне-Тазовский” Ямало-Ненецкого АО // *Лесоведение*. 2003. № 5. С. 10–17.
- Черниковский Д.М.* Оценка взаимосвязей морфометрических характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2016. Вып. 216. С. 69–90.
- Черниковский Д.М.* Автоматическая классификация поверхности рельефа для изучения количественных и качественных характеристик лесов // *Там же*. 2017. Вып. 219. С. 74–95.
- Черниковский Д.М.* Оценка связей морфометрических характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов на основе цифровых моделей рельефа ASTER и SRTM // *Сибирский лесной журн*. 2017а. № 3. С. 28–39.
- Черниковский Д.М.* Использование автоматической классификации рельефа Ивахаша и Пайка для оценки количественных и качественных характеристик лесов на основе моделей высот рельефа и поверхности // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2018. Вып. 223. С. 100–126.
- Шарый П.А.* Геоморфометрия в науках о земле и экологии, обзор методов и приложений // *Известия Самарского НЦ РАН*. 2006. Т. 8. № 2. С. 458–473.
- Шарый П.А.* Геоморфометрический анализ пространственной изменчивости почв и экосистем: Дис. ... д-ра биол. наук (спец. 03.02.08). Ростов-на-Дону: Южный фед. университет, 2016. 197 с.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) // *Geoscientific Model development*. 2015. V. 2.1.4. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Gallant J.C., Read A.M., Dowling T.I.* Removal of tree offsets from SRTM and other digital surface models // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. V. XXXIX-B4. P. 275–280. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-275-2012>
- Hengl, T., Reuter, H.I. (eds) *Geomorphometry: Concepts. Software. Applications // Developments in Soil Science*. 2008. V. 33. Elsevier. 772 p.
- Hrvatini M., Perko D.* Morphological typifications of Slovenia’s surface using global classification methods // *Geografski Vestnik*. 2012. V. 84. № 1. P. 39–50.
- Iwahashi J., Pike R.* Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature // *Geomorphology*. 2007. V. 86. Is. 3–4. P. 409–440.
- Jucker T., Bongalov B., Burslem D., Nilus R., Dalponte M., Lewis S., Phillips O., Qie L., Coomes D.* Topography shapes the structure, composition and function of tropical forest landscapes // *Ecology Letters*. 2018. V. 21. P. 989–1000. <https://doi.org/10.1111/ele.12964>
- Kellndorfer J., Walkera W., Piercea L., Dobsona C., Fitesb J.A., Hunsakerc C., Vonad J., Clutter M.* Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 93. P. 339–358.
- STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual. 2010. 305 p. URL: http://cdn2.hubspot.net/hubfs/402067/Manuals/_Statgraphics_Centurion_XVII_User_Manual.pdf?t=1528978971442
- Wilson M.F.J., O’Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J.* Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope // *Marine Geodesy*. 2007. V. 30. P. 3–35.
- Zevenbergen L.W., Thorne C.R.* Quantitative Analysis of Land Surface Topography // *Earth Surface Processes & Landforms*. 1987. V. 12. P. 47–56.
- Zwoliński Z., Gudowicz J.* Geomorphometric analysis of morphoclimatic zones on the Earth // *Geomorphometry for Geosciences*. Jasiewicz J., Zwoliński Zb., Mitasova H., Hengl T. (eds). Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Adam Mickiewicz University in Poznań – Institute of Geocology and Geoinformation. 2015. P. 19–22.

The Analysis of Relations between the Forests Structure and Productivity and the Morphometric Characteristics of Landscape on the Example of Leningrad Oblast Landscapes

A. S. Alekseev¹ and D. M. Chernikhovskii^{1, *}

¹*Saint-Petersburg State Forest Technical University, 5, Institutsky per., St. Petersburg, 194021 Russian Federation*

**E-mail: cherndm2006@yandex.ru*

On the example of twelve model plots, related to eleven different types of Leningrad Oblast landscapes an algorithm was shown, regarding the determination of the correlations between the structural characteristics and productivity of the forests on one hand and the morphometric characteristics of landscape on another. Geoinformation forestry databases, data from ASTER GDEM survey as well as landscape maps were used as sources for the research. Geoinformation systems were used to form the spatial datasets, to build a grid with a 1 km pitch, to determine the generalized structural and productivity characteristics of the forests (mean stand of timber, quality classes, rates of the dominating species, area covered by different forest types and by the dominating species). Automatic landscapes classification based on a data from the global digital altitudinal model ALTER was performed using Iwahashi-Pike method. During the classification process each pixel of the altitudinal model was allotted to one of the eight classes, based on the calculated values of the morphometric characteristics of landscape – slope steepness, texture and convexity. Key components analysis was employed to determine a set of form classes that explain most of the landscape diversity in model plots. Correlations between the representation of the determined set of landscape classes and some of the productivity and structural characteristics of the forests were revealed using the rank correlation analysis. As a result, an explanation was provided for how the landscape affects the conditions of forest ecotopes. Morphometric characteristics used for classification – slope steepness, texture and convexity, can determine the draining conditions in forest ecotopes and, as a result, affect the the productivity and structural characteristics of the forests. The regression correlations were revealed between the landscape form classes and the productivity and structural characteristics of the forests for different landscape levels and landscape types of the Leningrad Oblast. Thus, the results obtained allow for a positive outlook on the perspectives of the further studies in this direction, and for regarding the geomorphometry methods a possible instrument for the forest inventory.

Keywords: landscape morphometric characteristics, automatic classification of landscape forms, digital landscape model, structure and productivity of the forests, landscape, regression analysis.

REFERENCES

- Alekseev A.S., Chernikhovskii D.M., *Struktura i produktivnost' lesov v zavisimosti ot formy poverkhnosti rel'efa landshaftov (na primere Karel'skogo peresheika Leningradskoi oblasti) (Structure and productivity of forests against the surface land form of terrains (case of Karelian Isthmus in Leningrad Oblast))*, *Lesovedenie*, 2001, No. 3, pp. 23–30.
- Alekseev A.S., Nikiforov A.A., *Vliyanie rel'efa na strukturu i produktivnost' lesnykh landshaftov s primeneniem 3D-modelirovaniya na primere Lisinskogo uchebno-opytного leskhozha (Surface topography controls of the structure and productivity of forest landscapes: analysis with 3D-modeling based on GIS-technology application (Lisino experimental forest station))*, *Lesovedenie*, 2014, No. 5, pp. 42–53.
- Chernikhovskii D.M., Alekseev A.S., *Vliyanie formy poverkhnosti rel'efa na strukturu i produktivnost' lesnykh landshaftov (na primere zapovednika Verkhne-Tazovskii Yamalo-Nenetskogo AO) (Effects of topographic form on structure and productivity of forest landscape (by the example of the Verkhne-Tazovskii Reserve, Yamalo-Nenets Autonomous Area))*, *Lesovedenie*, 2003, No. 5, pp. 10–17.
- Chernikhovskii D.M., *Analiz vliyaniya kolichestvennykh kharakteristik poverkhnosti rel'efa na strukturu lesnogo rastitel'nogo pokrova raznykh regionov (Structure of the vegetation cover of different regions as it determined by relief surface quantitative features)*, *Izvestiya lesotekhnicheskoi akademii*, 2002, Vol. 10, No. 168, pp. 67–75.
- Chernikhovskii D.M., *Avtomaticheskaya klassifikatsiya poverkhnosti rel'efa dlya izucheniya kolichestvennykh i kachestvennykh kharakteristik lesov (Automatic classification of surface topography to the quantitative and qualitative characteristics of forests)*, *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2017, No. 219, pp. 74–95.
- Chernikhovskii D.M., *Ispol'zovanie avtomaticheskoi klassifikatsii rel'efa Ivakhashi i Paika dlya otsenki kolichestvennykh i kachestvennykh kharakteristik lesov na osnove modeli vysot rel'efa i poverkhnosti (Using the automatic classification of relief by Iwahashi and Pike to assess the quantitative and qualitative characteristics of forests on the basis of elevation models of terrain and surface)*, *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2018, No. 223, pp. 100–126.
- Chernikhovskii D.M., *Otsenka svyazei morfometricheskikh kharakteristik rel'efa s kolichestvennymi i kachestvennymi kharakteristikami lesov na osnove tsifrovyykh modelei rel'efa ASTER i SRTM (Assessment of the relationships between morphometric characteristics of relief with quantitative and qualitative characteristics of forests using ASTER and SRTM digital terrain models)*, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 3, pp. 28–39.

- Chernikhovskii D.M., Otsenka vzaimosvyazei morfometricheskikh kharakteristik rel'efa s kolichestvennymi i kachestvennymi kharakteristikami lesov (Assesment of relations hips between morphometric characteristics of relief with quantitative and qualitative characteristics of forests), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2016, No. 216, pp. 69–90.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J., System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geoscientific Model development*, 2015. Doi 10.5194/gmd-8-1991-2015
- Danilova I.V., Ryzhkova V.A., Korets M.A., Algoritm avtomatizirovannogo kartografirovaniya sovremennogo sostoyaniya i dinamiki lesov na osnove GIS (A GIS-aided algorithm for mapping the current forest state and dynamics), *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnye tekhnologii*, 2010, Vol. 8, No. 4, pp. 15–24.
- Farber S.K., Kuz'mik N.S., Bryukhanov N.V., Perspektivy ispol'zovaniya dannykh SRTM dlya resheniya lesnykh nauchno-prakticheskikh zadach (Prospects for using SRTM data to solve forest scientific and practical problems), *GEO-Sibir'-2013*, Proc. IX International Scientific Congress, Novosibirsk, April 15–26, 2013, Novosibirsk: Sibirskaya gos. geodezicheskaya akademiya, 2013, Vol. 4, pp. 85–88.
- Florinskii I.V., Illyustrirovannoe vvedenie v geomorfometriyu (Illustrated introduction to geomorphometry), *Elektronnoe nauchnoe izdanie Al'manakh "Prostranstvo i Vremya"*, 2016, Vol. 11, No. 1: Sistema planeta Zemlya, available at: 2227-9490e-aprovr_e-ast11-1.2016.71 (July 16, 2018).
- Gallant J.C., Read A.M., Dowling T.I., Removal of tree offsets from SRTM and other digital surface models, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, Vol. XXXIX-B4, pp. 275–280. Doi 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-275-2012
- Gromtsev A.N., *Landshaftnyye zakonmernosti struktury i dinamiki srednetaezhnykh osnovnykh lesov Karelii* (Landscape specifics of the structure and dynamics of the mid-taiga pine forests of Karelia), Petrozavodsk: Izd-vo KarNTs RAN, 1993, 160 p.
- Gromtsev A.N., Obzor rezul'tatov fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy evropeiskikh taezhnykh lesov Rossii na landshaftnoi osnove (A review of the results of basic and applied landscape-based studies of the boreal forests of European Russia), *Landscape Science: theory, methods, landscape-ecological support of land use and sustainable development*, Tyumen'-Tobol'sk, August 22–25, 2017, Tyumen': Izd-vo Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, pp. 33–38.
- Hengl T., Reuter H.I. (eds). *Geomorphometry: Concepts. Software. Applications*, Elsevier, 2008, Vol. 33, 772 p.
- Hrvatina M., Perko D., Morphological typifications of Slovenia's surface using global classification methods, *Geografski Vestnik*, 2012, Vol. 84, No. 1, pp. 39–50. <http://gislab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>, (June 16, 2018).
- http://www.racurs.ru/wiki/index.php/Global'nye_tsifrovye_modeli_vysot (June 16, 2018).
- Isachenko A.A., Knize A.A., Romanyuk B.D., Ekologicheskie funktsii lesa v yuzhnykh landshaftakh Severo-Zapada (Ecological functions of the forests in southern landscapes of the North-West), *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2000, Vol. 132, No. 1, pp. 3–12.
- Isachenko A.G., Knize A.A., Romanyuk B.D., Landshaftovedenie i aktual'nye problemy lesopol'zovaniya (Landscape study and relevant problems of forest use), *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 1999, Vol. 131, No. 3, pp. 17–23.
- Isachenko A.G., Landshaftnoe raionirovanie i tipologiya landshaftov Leningradskoi oblasti (Landscape zoning and landscape typology of the Leningrad Oblast), *Obshchie printsipy strategii lesopol'zovaniya i lesovyrashchivaniya na landshaftno-tipologicheskoi osnove* (General Principles of the Strategy of Forest Management and Forest Cultivation on a Landscape-typological Basis), Book of scientific papers, St. Petersburg: Izd-vo SPbNILKh, 1994, pp. 11–25.
- Isachenko A.G., Landshaftnye tipy lesnykh mestoproizrastanii: opredelenie, klassifikatsiya, kartografirovanie, kharakteristika (Types of landscape of forest locations: identification, classification, mapping and description), In: *Ustoichivoe lesoupravlenie i kriterii ego otsenki v period perekhoda k rynochnoi ekonomike (Sustainable forest management: the assessment criteria in the course of transition to market economy)*, Saint-Petersburg: 1998, pp. 161–183.
- Iwahashi J., Pike R., Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature *Geomorphology*, 2007, Vol. 86, No. 3–4, pp. 409–440.
- Jucker T., Bongalov B., Burslem D., Nilus R., Dalponte M., Lewis S., Phillips O., Qie L., Coomes D., Topography shapes the structure, composition and function of tropical forest landscapes, *Ecology Letters*, 2018, Vol. 21, pp. 989–1000. Doi 10.1111/ele.12964
- Karionov Y.I., Otsenka tochnosti matritsy SRTM (Estimation of the accuracy of a matrix of heights of SRTM), *Geoprofi*, 2010, No. 1, pp. 48–51.
- Kellendorfer J., Walkera W., Piercea L., Dobsona C., Fitesb J.A., Hunsakerc C., Vonad J., Clutter M., Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets, *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 93, pp. 339–358.
- Kireev D.M., *Lesnoe landshaftovedenie* (Forest landscape science), Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGLTA, 2007, 540 p.
- Kolbovskii E.Y., *Landshaftovedenie* (Landscape science), M.: Akademiya, 2006, 480 p.
- Landshaftnaya karta Leningradskoi oblasti. Masshtab 1 : 1500000*, (Landscape map of the Leningrad Oblast 1 : 1500000), Institut geoekologii RAN URL, available at: <http://hge.spbu.ru/mapgis/subekt/spb/landshaft.pdf> (July 16, 2018)
- Netrebin P.B., *Morfometricheskii analiz rel'efa Bol'shogo Kavkaza: Avtoref. dis. ... kand. geograf. nauk* (Morphometric analysis of the Caucasus Mountains relief. Extended abstract of candidate's geograph. sci. thesis), Krasnodar: Krasnodarskii gosudarstvennyi universitet, 2012, 23 p.
- Obshchie printsipy strategii lesopol'zovaniya i lesovyrashchivaniya na landshaftno-tipologicheskoi osnove*, (General principles of forest exploitation and silviculture based on landscape typology), Saint-Petersburg: SPbNILKh, 1994, 134 p.
- Sharyi P.A., *Geomorfometricheskii analiz prostranstvennoi izmenchivosti pochv i ekosistem: Dis. ... d-ra biol. nauk* (Geo-

morphometrical analysis of spatial diversity of soils and ecosystems. Doctor's biol. sci. thesis), Rostov-na-Donu: Yuzhnyi fed. universitet, 2016, 197 p.

Sharyi P.A., Geomorfometriya v nauках o zemle i ekologii, obzor metodov i prilozhenii (Geomorphometry in Earth sciences and ecology, an overview of methods and applications), *Izvestiya Samarskogo NTs RAN*, 2006, Vol. 8, No. 2, pp. 458–473.

Skalaban V.D., Landshaftnaya differentsiatsiya territorii kak prirodno-geneticheskaya osnova adaptivnogo zemlepol'zovaniya (Landscape differentiation of territories as a natural, genetic basis for an adaptable land use), *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2009, Vol. 64, pp. 12–22.

Sokolov L.A., Lobanov G.V., Polyakova A.V., Ispol'zovanie vozmozhnostei modeli SRTM (Shuttle Radar Satellite Mission) v analize rel'efa kak faktora pochvoobrazovaniya (na primere Bryanskogo lesnogo massiva) (Using the capabilities of the SRTM (Shuttle Radar Satellite Mission) model in the analysis of terrain as a soil formation factor (using the example of the Bryansk Forest)), *Vestnik Bryanskogo gos. universiteta*, 2010, No. 4, pp. 237–243.

STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual, 2010, 305 p., available at: http://cdn2.hubspot.net/hubfs/402067/Manuals_/Statgraphics_Centurion_XVII_User_Manual.pdf?t=1528978971442

Sysuev V.V., Sharyi P.A., Vydelenie tipov uslovii mesto-proizrastaniya dlya lesoustroistva po uchastkovomu metodu (Clusterization of the site types for the key-site method of forest husbandry), *Lesovedenie*, 2000, No. 5, pp. 10–19.

Wilson M.F.J., O'connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J., Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope, *Marine Geodesy*, 2007, Vol. 30, pp. 3–35.

Zevenbergen L.W., Thorne C.R., Quantitative Analysis of Land Surface Topography, *Earth Surface Processes & Landforms*, 1987, Vol. 12, pp. 47–56.

Zwoliński Z., Gudowicz J., Geomorphometric analysis of morphoclimatic zones on the Earth, In: *Geomorphometry for Geosciences*, Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Adam Mickiewicz University in Poznań – Institute of Geology and Geoinformation, 2015, pp. 19–22.