

УДК 630*5:581.5:911.52

ОЦЕНКА СВЯЗЕЙ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬЕФА С КОЛИЧЕСТВЕННЫМИ И КАЧЕСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ASTER И SRTM

Д. М. Черниковский

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова
194021, Санкт-Петербург, Институтский переулок, 5

E-mail: cherndm2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.07.2016 г.

Показаны результаты оценки взаимосвязей количественных и качественных характеристик лесов и морфометрических характеристик рельефа на примере модельного участка в Нанайском лесничестве Хабаровского края. Актуальность исследования связана с необходимостью совершенствования системы лесоучетных работ в Российской Федерации, в том числе с применением ландшафтного подхода. Задачами исследования были: оценка взаимосвязей количественных и качественных характеристик лесов с характеристиками рельефа на разных уровнях управления лесами; определение морфометрических характеристик рельефа, значимых для структуры и продуктивности лесов; сравнение результатов, полученных на основе использования цифровых моделей рельефа ASTER и SRTM. Для модельного участка на основе материалов таксации и государственной инвентаризации лесов, а также цифровых моделей рельефа сформированы геоинформационные проекты. На основе разработанной методики средствами геоинформационных технологий определены морфометрические характеристики рельефа (средняя высота, среднее квадратическое отклонение высот, энтропия, экспозиция и крутизна склонов, индексы пересеченности и превышения), количественные и качественные характеристики лесов. Выполнен многофакторный регрессионный анализ, где в качестве зависимых переменных рассматривались характеристики лесов, в качестве независимых переменных – морфометрические характеристики рельефа. В результате выполненного исследования выявлен набор морфометрических характеристик рельефа, способных определять изменчивость количественных и качественных характеристик лесов. Получен набор линейных регрессионных уравнений, способных объяснять 30–50 % изменчивости зависимых переменных. Регрессионные уравнения, полученные на основе матриц ASTER и SRTM, сопоставимы по тесноте связей, но отличаются набором морфометрических характеристик. Результаты исследования позволяют говорить о наличии взаимосвязей характеристик лесов и морфометрических характеристик рельефа на разных уровнях управления лесами.

Ключевые слова: морфометрические характеристики рельефа, таксация лесов, государственная инвентаризация лесов, геоинформационные технологии, цифровые модели рельефа.

DOI: 10.15372/SJFS20170303

ВВЕДЕНИЕ

Возможными направлениями практической реализации ландшафтного подхода являются поиск и изучение взаимосвязей характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов. Рельеф как наиболее консервативный компонент ландшафта может определять потенциальную структуру категорий земель, типов лесных местопроизрастаний, особенности распространения и роста

лесообразующих пород, процессы лесовозобновления (Общие принципы..., 1994; Исаченко, 1998; Сысуев, Шарый, 2000; Сухих, 2005). Препятствием для однообразного описания рельефа ландшафтов является субъективность существующих «качественных» классификаций форм рельефа. Возможным путем совершенствования описания рельефа лесных ландшафтов представляется использование количественных (морфометрических) характеристик рельефа.

Количественные характеристики рельефа можно получать с помощью морфометрического анализа (Шарапов, 1967; Порядин, 1985; Якименко, 1990; Глейзер и др., 2006). Поиску взаимосвязей элементов рельефа лесных ландшафтов и характеристик структуры и продуктивности лесного растительного покрова посвящен ряд исследований (Алексеев, Черниховский, 2001; Черниховский, 2002; Черниховский, Алексеев, 2003; Данилова и др., 2010; Фомин, Залесов, 2013; Алексеев, Никифоров, 2014; Фарбер, 2014).

Источником информации для определения морфометрических характеристик рельефа могут служить свободные глобальные цифровые модели рельефа (ЦМР), получаемые на основе радарных съемок (Карионов, 2010; Соколов и др., 2010; Марков, 2011; Фарбер и др., 2013; Коротин, Попов, 2015; Глобальные цифровые модели..., 2017; Общее описание..., 2017). Неспоримыми преимуществами свободных ЦМР являются их доступность (сравнительно с топографическими картами и высокоточными ЦМР, реализуемыми на коммерческой основе), приемлемая для решения многих задач точность и значительный (глобальный) пространственный охват.

Исследование возможностей матриц SRTM и ASTER для решения аналитических задач показало, что модель SRTM имеет отклонения от пунктов государственной геодезической сети в пределах от -6 до $+9$ м, модель ASTER – от -16 до $+21$ м (Коротин, Попов, 2015). Авторы исследования заключили, что использование данных SRTM позволяет создавать топографические карты с сечением горизонталей $10-20$ м, ASTER – соответственно 25 м и более. Важно, что на качество обеих моделей может оказывать негативное влияние степень покрытия территории древесно-кустарниковой растительностью (Соколов и др., 2010; Марков, 2011; Коротин, Попов, 2015).

К потенциальным научно-практическим задачам лесного профиля, которые могут решаться с использованием матрицы SRTM, относятся: уточнение границ таксонов лесорастительного районирования; предварительная стратификация территории для лесоустройства, ГИЛ; картирование типов условий произрастания по показателям рельефа местности; реконструкция истории лесов; картирование ареалов отдельных видов растительного и животного мира; выявление лесов высокой природоохранной ценности;

ведение экологического мониторинга за деятельностью лесопромышленных предприятий (Фарбер и др., 2013).

Цель данного исследования – изучение взаимосвязей количественных характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов.

Задачи исследования:

– определение набора количественных (морфометрических) характеристик рельефа, потенциально значимых для структуры и продуктивности лесов;

– оценка взаимосвязей количественных и качественных характеристик лесов с характеристиками рельефа (на разных уровнях управления лесами);

– сравнение результатов, полученных на основе использования разных цифровых моделей рельефа (ASTER, SRTM).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Состав работ по основным этапам исследования отражен в табл. 1. Перечень используемых морфометрических характеристик рельефа отражен в табл. 2 (Wilson et al., 2007; Нетребин, 2012; Основные геоморфометрические параметры..., 2017). Большинство морфометрических характеристик рельефа определяется на основе цифровых моделей рельефа средствами ГИС (Zevenbergen, Thorne, 1987; Нетребин, 2012; Основные геоморфометрические параметры..., 2017).

Обзор публикаций, связанных с изучением взаимосвязей морфометрических характеристик рельефа с характеристиками лесного растительного покрова, показал, что на формирование лесных местопроизрастаний могут влиять такие количественные характеристики рельефа, как абсолютная высота (Алексеев, Никифоров, 2014), среднее квадратическое отклонение и энтропия высот (Алексеев, Черниховский, 2001; Черниховский, 2002; Черниховский, Алексеев, 2003), значения уклона и кривизны поверхности (Данилова и др., 2010), значения уклона, экспозиции склонов и кривизны поверхности (Фарбер, 2014), набор морфометрических характеристик рельефа, определяемых на основе свободных ЦМР (Черниховский, Шипилова, 2015).

В качестве объекта исследования выбран модельный участок в Анюйском участковом лесничестве (Нанайское лесничество, Хабаровский край). Выбор участка обусловлен выраженным

Таблица 1. Порядок и содержание работ по оценке взаимосвязей количественных и качественных характеристик лесов с морфометрическими характеристиками рельефа

| Этап | Содержание | Программное обеспечение |
|--|--|--|
| 1. Формирование проекта модельного участка в ГИС | Формирование проекта в ГИС. Экспорт набора векторных и растровых слоев (границы лесотаксационных выделов и страт ГИЛ, фрагменты лесных карт, материалы дистанционного зондирования Земли). Дополнение и корректировка атрибутивных характеристик слоев | ГИС QGIS, WinGIS, MS Excel |
| 2. Загрузка цифровых моделей рельефа | Получение цифровых моделей рельефа (ASTER, SRTM) на изучаемую территорию, их добавление в ГИС-проекты с обрезкой и перепроецированием в прямоугольную систему координат | ГИС QGIS, картографические сервисы CGIAR, USGS |
| 3. Определение морфометрических характеристик рельефа | Формирование на основе цифровых моделей рельефа растровых слоев с характеристиками уклонов, экспозиций склонов, индексов пересеченности, кривизны и др. Определение статистических характеристик рельефа внутри ячеек регулярной сети | ГИС QGIS, SAGA-GIS, MS Excel |
| 4. Определение количественных и качественных характеристик лесов | Формирование растровых слоев по отдельным характеристикам лесов (типы леса, страты ГИЛ, классы бонитета, преобладающие древесные породы и др.). Определение статистических характеристик лесов внутри ячеек регулярной сети | ГИС QGIS, MS Excel |
| 5. Определение взаимосвязей характеристик лесов с характеристиками рельефа | Экспорт атрибутивных данных с характеристиками рельефа и лесов по ячейкам регулярной сети в формат электронных таблиц. Оценка и интерпретация взаимосвязей характеристик лесов с характеристиками рельефа средствами регрессионного анализа | ГИС QGIS, программа Statgraphics |

рельефом, наличием однородных и актуальных лесочетных данных и отсутствием хозяйственной деятельности. Модельный участок относится к бореальным, переходным к суббореальным притихоокеанским подтаежным ландшафтам складчатых, глыбовых и вулканических низкогорий на осадочных и докембрийских кристаллических породах. На западном склоне Сихотэ-Алиня в низкогорно-подтаежной части преобладают пихтово-еловые неморально-травяные леса (Исаченко, 1985; Физическая география России..., 2017).

Материалы таксации лесов и стратификации ГИЛ получены путем стереоскопического дешифрирования материалов космической съемки после проведения тренировки и обучения исполнителей, сбора и обработки материалов пробных площадей (Березин, Черниковский, 2013, 2014; Березин и др., 2016).

На территорию модельного участка получены свободные цифровые модели рельефа ASTER и SRTM (для получения цифровых моделей рельефа использовались Интернет-ресурсы United States Geological Survey <https://usgs.gov/> и Consortium for spatial information <http://www.cgiar-csi.org/>).

Общие характеристики фрагментов матриц рельефа для модельного участка в целом близки. Для фрагмента матрицы SRTM (перепроецированной в систему координат UTM-53N) размер пикселя 79.14 на 79.14 м, средняя высота 475.35 м, медиана 458.0 м, среднее квадратическое отклонение 109.05 м. Для фрагмента матрицы ASTER (перепроецированной в систему координат UTM-53N) размер пикселя 29.10 на 29.10 м, средняя высота 478.78 м, медиана 461.0 м, среднее квадратическое отклонение 109.04 м. При этом варьирование высот матрицы SRTM заметно шире (рис. 1).

Исходными пространственными данными для исследования служили векторные слои (полигоны) с границами лесотаксационных выделов и страт ГИЛ. Атрибутами полигонов векторных слоев были характеристики лесотаксационных выделов и страт ГИЛ. Территория модельного участка была покрыта регулярной сетью квадратных ячеек со стороной 1000 м (рис. 2). Средствами ГИС определены морфо-

Таблица 2. Морфометрические характеристики рельефа

| Характеристики рельефа и их интерпретация | Оцениваемые морфометрические характеристики рельефа |
|--|--|
| Средняя высота участка. Характеризует среднюю высоту участка с учетом значений высот всех точек. В горных условиях высота определяет набор климатических показателей (состав солнечной радиации, температуру воздуха, режим осадков, циркуляции и др.) | \bar{h} – средняя высота, м |
| Среднее квадратическое отклонение высот участка. Характеризует меру отличия рельефа от горизонтальной плоскости, расположенной на уровне средней высоты участка, вертикальную расчлененность, размах между минимальным и максимальным значениями | δ – среднее квадратическое отклонение высот, м |
| Энтропия высот участка. Характеризует степень выровненности поверхности рельефа относительно средней высоты участка. Для равновысотных склонов энтропия является показателем кривизны – чем больше склон отличается от плоского, тем меньше его энтропия. Максимальная энтропия у ровных поверхностей | H – энтропия. Определялась по формуле $H = -\sum_{i=1}^N p_i * \ln(p_i),$ где $p_i = h_i / \sum_{i=1}^N h_i$, h_i – высота над уровнем моря в точке i , N – число точек поля высот участка |
| Экспозиция поверхности – угол по часовой стрелке между направлением на север и проекцией уклона на горизонтальную плоскость. Определяет основное направление линий тока (движение воды или иного материала вниз по склонам); ориентацию участка по отношению к потоку солнечных лучей, количество радиации, получаемой земной поверхностью; влияет на локальный климат участка | Доли площади склонов различных экспозиций по четырем сторонам света: E_N – север, E_E – восток, E_S – юг, E_W – запад, % |
| Уклон поверхности – угол наклона в точке пересечения горизонтальной плоскости и плоскости касательной к земной поверхности. Фундаментальный геоморфометрический параметр, связанный со следующими процессами и характеристиками ландшафта: поверхностным стоком и дренированием, эрозией, мощностью почвенного профиля, количеством солнечной энергии. Определяет микроклиматические особенности участка (в частности, температуру, эвапотранспирацию и влажность верхних слоев почвы) | \bar{S} – средний уклон участка, ° |
| Индекс превышения (TPI – Topographic Position Index) – разница высот центрального пикселя и среднего значения окружающих. Служит индикатором положительных и отрицательных элементов рельефа. Применяется в топографии и батиметрии (для изучения размещения организмов, обитающих на морском дне). Используется для характеристики водоразделов, классификации склонов и рельефа | \overline{TPI} – средний индекс превышения участка, м; доли площади с различными значениями индекса превышения, %: $TPI > 0$ – положительные, $TPI < 0$ – отрицательные значения |
| Пересеченность (Roughness) – максимальная разница высот центрального и окружающих пикселей в пределах области $N \times N$ элементов. Показатель вариабельности или шероховатости местности (морского дна) | \bar{R} – средняя пересеченность участка, м |

метрические характеристики рельефа – уклоны, экспозиции, индексы пересечения и превышения и др. Большую часть морфометрических характеристик рельефа рассчитывали изначально для каждого отдельного пикселя. Далее выполнялось обобщение полученных характеристик отдельных пикселей для квадратов сети.

Например, после формирования растрового слоя со значениями уклона поверхности в каждом пикселе определяли долю участков каждой ячейки регулярной сети по группам уклонов.

Характеристиками лесов служили обобщенные по ячейкам сети данные таксации (доли

площади преобладающих древесных пород и типов леса; средняя доля преобладающей породы в составе, средняя относительная полнота, средний класс бонитета, средний запас на 1 га) и результаты стратификации (доли площади страт ГИЛ, группы страт ГИЛ по преобладающим древесным породам и производительности).

На части модельного участка с выполненной таксацией лесов (27 ячеек сети) представлены насаждения с преобладанием ели (47 %), березы желтой (20 %), березы белой (11 %), лиственницы (10 %), пихты (9 %), кедра (2 %),

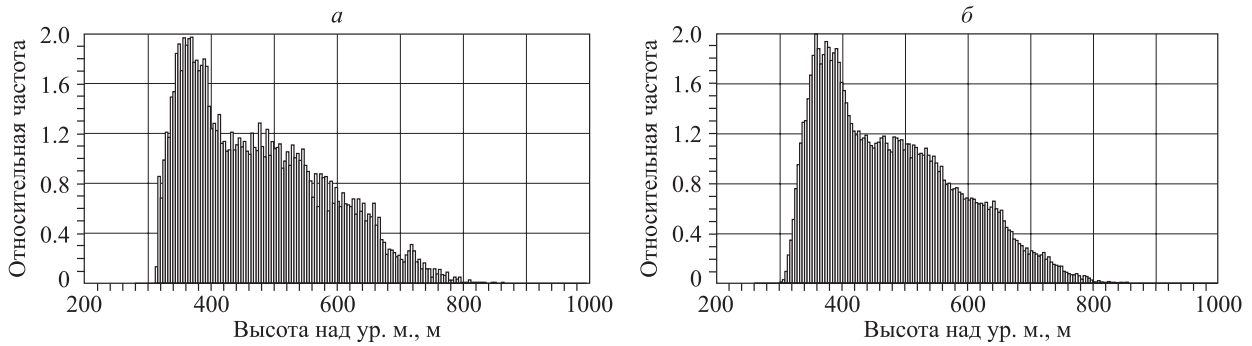


Рис. 1. Гистограммы высот рельефа: *а* – матрица SRTM, *б* – матрица ASTER.

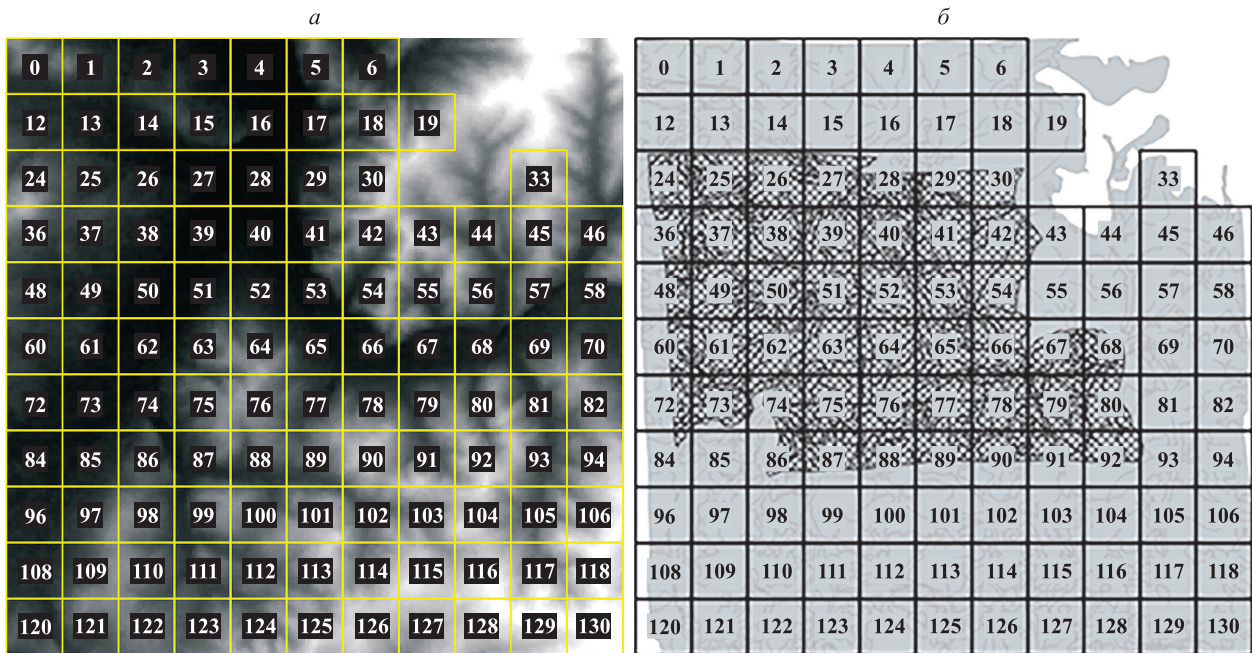


Рис. 2. Исходные пространственные данные на территорию модельного участка: *а* – цифровая модель рельефа с границами участков сети; *б* – векторные слои с границами лесотаксационных выделов и страт ГИЛ. Лесотаксационные выделы отмечены штриховкой.

тополя (1 %). Преобладают ельники зеленомошные (26 %), желтоберезовые смешанные леса (18 %), ельники мелко травно-зеленомошные (18 %), белоберезники кустарниковые (11 %), лиственничники вейниково-разнотравные (8 %), ельники разнотравно-мелкопапоротниковые (7 %), ельники долинные (4 %), желтоберезовые бархатые леса (2 %). Из представленных на модельном участке 26 страт ГИЛ (111 ячеек сети) преобладают, %: темнохвойные спелые и перестойные среднепроизводительные – 19.67; темнохвойные средневозрастные среднепроизводительные – 18.66; темнохвойные приспевающие среднепроизводительные – 14.37; мелколиственные спелые и перестойные среднепроизводительные – 6.07; молодняки естественного происхождения –

6.06; твердолиственные спелые и перестойные среднепроизводительные – 5.16.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью программы Statgraphics выполнен многофакторный регрессионный анализ взаимосвязей количественных и качественных характеристик лесов с морфометрическими характеристиками рельефа. В качестве зависимой переменной поочередно рассматривали количественные и качественные характеристики лесов, в качестве независимых переменных – морфометрические характеристики рельефа.

В табл. 3 показаны результаты регрессионного анализа взаимосвязей морфометрических характеристик рельефа с площадями страт ГИЛ.

Таблица 3. Результаты регрессионного анализа взаимосвязей площадей страт ГИЛ с морфометрическими характеристиками рельефа. Табличное значение критерия Фишера составляет 3.08 для двухфакторного и 2.69 для трехфакторного уравнения (уровень значимости 0.05; число наблюдений 111)

| Характеристика лесов | Параметры регрессионного уравнения | Значение параметра | Уровень значимости параметров (<i>p-value</i>) | Коэффициент детерминации R^2 , % | Уровень значимости уравнения (<i>p-value</i>) | Источник изменчивости | Доля влияния факторов в модельной изменчивости, % | Критерий Фишера | |
|--|---|--------------------|--|------------------------------------|---|-----------------------|---|-----------------|--|
| Площадь светлыхвойных всех групп возраста (кроме молодняков) и производительности, % | ЦМР SRTM | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 11.94 | 0.0006 | 37.98 | 0.0000 | – | | | |
| | \bar{R} | –0.36 | 0.0000 | | | \bar{R} | 81.22 | 57.15 | |
| | E_E | 0.14 | 0.0152 | | | E_E | 7.69 | 5.41 | |
| | E_S | 0.17 | 0.0062 | | | E_S | 11.09 | 7.80 | |
| | CONSTANT | 28.15 | 0.0000 | 39.09 | 0.0000 | – | | | |
| | \bar{S} | –1.46 | 0.0000 | | | \bar{S} | 81.35 | 59.86 | |
| | E_N | –0.18 | 0.0030 | | | E_N | 11.53 | 8.49 | |
| | E_W | –0.13 | 0.0241 | | | E_W | 7.12 | 5.24 | |
| | ЦМР ASTER | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 19.88 | 0.0000 | 28.69 | 0.0000 | – | | | |
| | \bar{R} | –1.03 | 0.0000 | | | \bar{R} | 88.59 | 40.97 | |
| | E_S | 0.23 | 0.0235 | | | E_S | 11.41 | 5.28 | |
| | CONSTANT | 33.85 | 0.0000 | 28.96 | 0.0000 | – | | | |
| | \bar{R} | –1.17 | 0.0000 | | | \bar{R} | 87.8 | 41.13 | |
| | E_N | –0.25 | 0.0186 | | | E_N | 12.2 | 5.71 | |
| | Площадь темныхвойных всех групп возраста (кроме молодняков) и производительности, % | ЦМР SRTM | | | | | | | |
| | | CONSTANT | –13.57 | 0.0872 | 51.0 | 0.0000 | – | | |
| \bar{h} | | 0.09 | 0.0000 | \bar{h} | | | 50.1 | 58.86 | |
| E_N | | 0.35 | 0.0002 | E_N | | | 8.57 | 10.07 | |
| E_W | | 0.57 | 0.0000 | E_W | | | 41.33 | 48.54 | |
| CONSTANT | | 58.59 | 0.0000 | 44.08 | 0.0000 | – | | | |
| \bar{R} | | 0.42 | 0.0000 | | | \bar{R} | 49.5 | 44.40 | |
| E_E | | –0.49 | 0.0000 | | | E_E | 28.39 | 25.47 | |
| E_S | | –0.44 | 0.0000 | | | E_S | 22.11 | 19.83 | |
| CONSTANT | | 15.77 | 0.0016 | 42.64 | 0.0000 | – | | | |
| δ | | 0.34 | 0.0020 | | | δ | 50.95 | 43.18 | |
| E_N | | 0.35 | 0.0007 | | | E_N | 10.86 | 9.21 | |
| E_W | | 0.55 | 0.0000 | | | E_W | 38.19 | 32.37 | |
| ЦМР ASTER | | | | | | | | | |
| CONSTANT | | –25.65 | 0.0067 | 42.94 | 0.0000 | – | | | |
| \bar{h} | | 0.10 | 0.0000 | | | \bar{h} | 57.18 | 49.04 | |
| E_N | | 0.52 | 0.0013 | | | E_N | 11.88 | 10.19 | |
| E_W | | 0.74 | 0.0000 | | | E_W | 30.94 | 26.53 | |
| CONSTANT | 36.28 | 0.0006 | 42.39 | 0.0000 | – | | | | |
| \bar{h} | 0.10 | 0.0000 | | | \bar{h} | 57.88 | 48.58 | | |
| E_E | –0.62 | 0.0000 | | | E_E | 19.86 | 16.67 | | |
| E_S | –0.66 | 0.0000 | | | E_S | 22.27 | 18.69 | | |

Согласно действующей схеме стратификации лесов (Приложение 1 к Методическим рекомендациям по проведению государственной инвентаризации лесов. Единая схема стратификации лесов Российской Федерации. Приказ Рослесхоза от 10 ноября 2011 года № 472), критериями для выделения страт служат группа преобладающих пород, класс возраста и группа классов бонитета. Страты, выделяемые по данным критериям, могут существенно отличаться по лесотаксационным характеристикам и занимаемым местопроизрастаниям.

Доля страт с преобладанием светлохвойных (кедр, сосна, лиственница) растет с увеличением площади склонов восточной и (или) южной экспозиции, а также доли ровных участков (снижение индекса пересеченности).

Доля страт с преобладанием темнохвойных (ель, пихта) растет с увеличением средней высоты участка, площади склонов северной и западной экспозиции, с ростом пересеченности рельефа (среднего квадратического отклонения высот, индекса пересеченности).

В табл. 4 показаны результаты регрессионного анализа взаимосвязей количественных и качественных характеристик лесов (материалы таксации лесов) с морфометрическими характеристиками рельефа.

Типичные местопроизрастания ельников зеленомошных – склоны средней и большой крутизны, преимущественно северной, северо-восточной, северо-западной экспозиции; дренированные участки горных плато (Лесной план..., 2008). Увеличение доли площади насаждений данного типа леса для матрицы ASTER связано с увеличением выровненности склонов (ростом энтропии).

Типичные местопроизрастания лиственничников вейниково-разнотравных – пологие склоны, шлейфы склонов разной экспозиции, речные террасы и другие формы рельефа с избыточным частично застойным увлажнением. Увеличение доли площади насаждений данного типа леса связано со снижением расчлененности (среднего квадратического отклонения высот или пересеченности) и выровненности (энтропии) участка.

Типичные местопроизрастания белоберезников лещино-кустарниковых, кроме занимающих плоские и с уклоном менее 5° местопроизрастания – склоны разной, но преимущественно средней крутизны и разной, но преимущественно восточной, северной, западной экспозиции на всех высотных уровнях, кроме подгольцовой полосы. Увеличение доли площади данного типа

леса связано для обеих моделей рельефа либо со снижением расчлененности (среднего квадратического отклонения высот или индекса пересеченности), либо со снижением среднего уклона.

Типичные местопроизрастания желтоберезовых смешанных лесов, кроме занимающих местопроизрастания с уклоном менее 5°, представляют собой склоны всех экспозиций, разной крутизны в среднем и верхнем поясе гор. Увеличение доли площади насаждений данного типа леса связано с увеличением абсолютной высоты участка.

Также в табл. 4 представлены результаты регрессионного анализа взаимосвязей площадей насаждений основных преобладающих пород и морфометрических характеристик рельефа.

Доля площади насаждений с преобладанием ели увеличивается с ростом представленности склонов северной и западной экспозиций, а также участков с положительным индексом превышения (SRTM).

Увеличение доли площади пихтовых насаждений связано со снижением доли склонов южной экспозиции, уменьшением выровненности склонов (энтропии), увеличением средней высоты и увеличением доли участков с положительным индексом превышения (ASTER).

Доля площади насаждений с преобладанием лиственницы растет с уменьшением расчлененности участка (среднего квадратического отклонения). Для модели SRTM рост доли лиственницы также связан с одновременным снижением выровненности (энтропии), расчлененности (индекса расчлененности) и доли склонов северной экспозиции.

Рост доли насаждений с преобладанием кедра связан с увеличением доли склонов западной экспозиции и среднего индекса превышения (либо доли склонов с положительными значениями индекса превышения для SRTM).

Рост доли площади насаждений с преобладанием березы белой связан со снижением расчлененности участка (среднего квадратического отклонения высот или среднего уклона) для обеих моделей рельефа.

Доля насаждений с преобладанием березы желтой увеличивается с ростом средней высоты и снижением среднего индекса превышения.

Отсутствие статистических связей между иными характеристиками лесов и характеристиками рельефа может объясняться следующими причинами:

– широким диапазоном экологических условий для данных характеристик;

Таблица 4. Результаты регрессионного анализа взаимосвязей количественных и качественных характеристик лесов (таксация лесов) с морфометрическими характеристиками рельефа. Табличное значение критерия Фишера составляет 3.40 для двухфакторного и 3.03 для трехфакторного уравнения (уровень значимости 0.05; число наблюдений 27)

| Характеристика лесов | Параметры регрессионного уравнения | Значение параметра | Уровень значимости параметров (<i>p-value</i>) | Коэффициент детерминации, R^2 , % | Уровень значимости уравнения (<i>p-value</i>) | Источник изменчивости | Доля влияния факторов в модельной изменчивости, % | Критерий Фишера | | | |
|---|------------------------------------|--------------------|--|-------------------------------------|---|-----------------------|---|-----------------|-----------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | |
| Доля площади ельников зеленомошников (26 % площади) | ЦМР АСТЕР | | | | | | | | | | |
| | CONSTANT | -1991.85 | 0.0002 | 41.93 | 0.0002 | - | | | | | |
| | H | 283.83 | 0.0002 | | | | | | | | |
| Доля площади лиственничников вейниково-разнотравных (8 % площади) | ЦМР SRTM | | | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 906.95 | 0.0021 | 46.47 | 0.0002 | - | | | | | |
| | δ | -0.50 | 0.0003 | | | | | | | | |
| | H | -168.66 | 0.0026 | δ | 54.03 | 13.28 | | | | | |
| | CONSTANT | 844.67 | 0.0047 | 42.25 | 0.0005 | - | | | | | |
| | \bar{R} | -0.48 | 0.0009 | | | | | | \bar{R} | 56.18 | 11.81 |
| H | -157.05 | 0.0057 | H | | | | | | 43.82 | 9.21 | |
| Доля площади еловых насаждений (47 % площади) | ЦМР SRTM | | | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 27.50 | 0.0000 | 33.83 | 0.0009 | - | | | | | |
| | \bar{R} | -0.52 | 0.0009 | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 28.89 | 0.0000 | 38.20 | 0.0004 | - | | | | | |
| | δ | -0.54 | 0.0004 | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 27.43 | 0.0000 | 34.01 | 0.0008 | - | | | | | |
| | \bar{S} | -2.01 | 0.0008 | | | | | | | | |
| | ЦМР АСТЕР | | | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 29.90 | 0.0000 | 37.91 | 0.0004 | - | | | | | |
| | δ | -0.54 | 0.0004 | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 35.57 | 0.0001 | 27.90 | 0.0027 | - | | | | | |
| | \bar{S} | -2.02 | 0.0027 | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 35.08 | 0.0001 | 26.90 | 0.0033 | - | | | | | |
| | \bar{R} | -1.39 | 0.0033 | | | | | | | | |
| | ЦМР SRTM | | | | | | | | | | |
| | CONSTANT | -58.95 | 0.0019 | 43.54 | 0.0001 | - | | | | | |
| \bar{h} | 0.19 | 0.0001 | | | | | | | | | |
| ЦМР АСТЕР | | | | | | | | | | | |
| CONSTANT | -61.19 | 0.0015 | 44.20 | 0.0001 | - | | | | | | |
| \bar{h} | 0.20 | 0.0001 | | | | | | | | | |
| Доля площади пихтовых насаждений (9 % площади) | ЦМР SRTM | | | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 0.77 | 0.0105 | 49.01 | 0.0003 | - | | | | | |
| | E_N | 0.0046 | 0.0064 | | | | | | E_N | 15.6 | 4.37 |
| | E_W | 0.0069 | 0.0002 | | | | | | E_W | 64.57 | 18.07 |
| $TPI > 0$ | -0.01 | 0.0273 | $TPI > 0$ | | | | | | 19.83 | 5.55 | |
| Доля площади пихтовых насаждений (9 % площади) | ЦМР АСТЕР | | | | | | | | | | |
| | CONSTANT | 13.68 | 0.0020 | 60.29 | 0.0001 | - | | | | | |
| | $TPI > 0$ | 0.05 | 0.0164 | | | | | | $TPI > 0$ | 16.93 | 7.36 |
| | \bar{h} | 0.0016 | 0.0030 | | | | | | \bar{h} | 9.26 | 4.03 |
| | H | -2.34 | 0.0003 | | | | | | H | 41.97 | 18.25 |
| E_S | -0.0071 | 0.0012 | E_S | | | | | | 31.84 | 13.85 | |

Окончание табл. 4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|------------------|---------|------------------|--------|--------|------------------|-------|-------|
| Доля площади лиственных насаждений (10 % площади) | ЦМР SRTM | | | | | | | |
| | CONSTANT | 9.68 | 0.0091 | 43.66 | 0.0004 | – | | |
| | δ | –0.0066 | 0.0003 | | | δ | 65.86 | 14.59 |
| | H | –1.79 | 0.0112 | | | H | 34.14 | 7.56 |
| | CONSTANT | 8.38 | 0.0167 | 48.59 | 0.0003 | – | | |
| | H | –1.52 | 0.0217 | | | H | 16.6 | 4.58 |
| | \bar{R} | –0.0064 | 0.0003 | | | \bar{R} | 65.68 | 18.11 |
| | E_N | –0.0031 | 0.0373 | | | E_N | 17.73 | 4.89 |
| | ЦМР ASTER | | | | | | | |
| | CONSTANT | 0.31 | 0.0001 | 28.83 | 0.0023 | – | | |
| | δ | –0.0060 | 0.0023 | | | | | |
| Доля площади кедровых насаждений (2 % площади) | ЦМР SRTM | | | | | | | |
| | CONSTANT | –2.11 | 0.0101 | 51.34 | 0.0002 | – | | |
| | E_w | 0.0013 | 0.0005 | | | E_w | 56.1 | 17.08 |
| | H | 0.40 | 0.0103 | | | H | 19.53 | 5.94 |
| | \overline{TPI} | 0.04 | 0.0121 | | | \overline{TPI} | 24.37 | 7.42 |
| | CONSTANT | –1.78 | 0.0187 | 56.62 | 0.0001 | – | | |
| | $tpi > 0$ | 0.0041 | 0.0029 | | | $tpi > 0$ | 43.69 | 16.14 |
| | H | 0.3028 | 0.0347 | | | H | 10.83 | 4.00 |
| | E_w | 0.0013 | 0.0004 | | | E_w | 45.48 | 16.80 |
| | ЦМР ASTER | | | | | | | |
| | CONSTANT | –0.034 | 0.0631 | 41.33 | 0.0006 | – | | |
| E_w | 0.0023 | 0.0019 | E_w | | | 57.08 | 15.59 | |
| \overline{TPI} | 0.24 | 0.0397 | \overline{TPI} | | | 17.32 | 4.73 | |
| Доля площади насаждений березы белой (11 %) | ЦМР SRTM | | | | | | | |
| | CONSTANT | 0.30 | 0.0000 | 39.07 | 0.0003 | – | | |
| | δ | –0.0055 | 0.0003 | | | | | |
| | CONSTANT | 0.28 | 0.0000 | 34.55 | 0.0008 | – | | |
| | \bar{S} | –0.021 | 0.0008 | | | | | |
| | ЦМР ASTER | | | | | | | |
| | CONSTANT | 0.31 | 0.0000 | 38.80 | 0.0003 | – | | |
| | δ | –0.0056 | 0.0003 | | | | | |
| CONSTANT | 0.37 | 0.0000 | 28.66 | 0.0024 | – | | | |
| \bar{S} | –0.02 | 0.0024 | | | | | | |
| Доля площади насаждений березы желтой (20 %) | ЦМР SRTM | | | | | | | |
| | CONSTANT | –0.74 | 0.0015 | 42.67 | 0.0005 | – | | |
| | \bar{h} | 0.0023 | 0.0001 | | | \bar{h} | 74.6 | 15.93 |
| | \overline{TPI} | –0.13 | 0.0286 | | | \overline{TPI} | 25.4 | 5.43 |
| | ЦМР ASTER | | | | | | | |
| | CONSTANT | –0.72 | 0.0016 | 42.27 | 0.0005 | – | | |
| | \bar{h} | 0.0023 | 0.0001 | | | \bar{h} | 76.61 | 16.11 |
| \overline{TPI} | –0.95 | 0.0363 | \overline{TPI} | | | 23.39 | 4.92 | |

– более значительным влиянием на формирование лесных местопроизрастаний иных факторов, кроме рельефа.

Небольшое количество установленных зависимостей для страт ГИЛ может быть связано со значительным обобщением лесотаксационных и лесорастительных характеристик насаждений при стратификации лесов. При действующем варианте стратификации лесов (по критериям – порода, класс возраста и класс бонитета) лесорастительные условия не учитываются.

Относительно низкие характеристики тесноты связи полученных регрессионных уравнений (коэффициенты детерминации) могут объясняться рядом наиболее очевидных причин:

– методическими недостатками, в частности использованием исключительно линейных зависимостей;

– недоучетом влияния на структуру и продуктивность лесов иных факторов, кроме формы поверхности рельефа (интенсивности и характера хозяйственной деятельности, динамики лесных пожаров, подстилающих горных пород, почв, микроклимата, конкуренции и др.);

– недоучетом региональных (ландшафтных) особенностей структуры и продуктивности лесов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования:

– предложена методика оценки взаимосвязей количественных и качественных характеристик лесов с характеристиками рельефа;

– выявлен набор морфометрических характеристик рельефа, способных определять изменчивость количественных и качественных характеристик лесов.

В результате выполнения регрессионного анализа взаимосвязей характеристик лесов с морфометрическими характеристиками рельефа установлено:

– морфометрические характеристики рельефа могут объяснять 30–50 % изменчивости количественных и качественных характеристик лесов;

– среди набора используемых морфометрических характеристик рельефа не выявлено универсальных, способных определять изменчивость многих характеристик лесов;

– возможна замена одних морфометрических характеристик рельефа (независимых переменных) другими;

– использование в качестве независимых переменных морфометрических характеристик рельефа, определяемых на основе матриц ASTER и SRTM, позволяет получать близкие по тесноте связи регрессионные уравнения;

– определены взаимосвязи морфометрических характеристик рельефа и характеристик лесов для разных уровней управления лесами (ГИЛ и лесоустройство).

Планируются следующие направления для продолжения исследования:

– развитие и интерпретация полученных зависимостей;

– поиск иных статистических закономерностей (например, нелинейной регрессии), способных характеризовать экологические особенности местопроизрастаний на основе морфометрических характеристик рельефа;

– совмещение применяемых подходов (поиск регрессионных зависимостей между характеристиками формы поверхности рельефа и структуры, а также продуктивности лесов) с дистанционными методами и средствами пространственного анализа;

– изучение взаимосвязей характеристик формы поверхности рельефа и характеристик структуры и продуктивности лесов на примере крупного региона.

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.
- Березин В. И., Черниковский Д. М.* Опыт лесного стереодешифрирования с применением специального программно-аппаратного обеспечения и ГИС-технологий для целей выполнения работ по государственной инвентаризации лесов в объектах с наличием труднодоступных территорий // *Сб. мат-лов IX Междунар. науч. конгр. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013*. Т. 4. Новосибирск: СГГА, 2013. С. 112–121.
- Березин В. И., Черниковский Д. М.* Разработка принципов и методов лесотаксационного аналитического и измерительного дешифрирования лесных страт и лесотаксационных выделов по материалам цифровых (сканерных) косми-

- ческих съемок высокого и сверхвысокого пространственного разрешения // Информационные технологии в лесном хозяйстве, охране природы и ландшафтном строительстве: сб. ст. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. С. 5–14.
- Березин В. И., Черниковский Д. М., Архипов В. И.* Методика выполнения государственной инвентаризации лесов в объектах с наличием труднодоступных территорий // Изв. Санкт-Петербургск. лесотехн. акад. 2016. Вып. 214. С. 6–26.
- Глейзер И. В., Копанева И. М., Рублева Е. А.* Некоторые аспекты использования ГИС-технологий при морфометрическом анализе рельефа // Науки о Земле. 2006. № 11. С. 143–146.
- Глобальные цифровые модели высот, 2017. <http://www.racurs.ru/wiki>
- Данилова И. В., Рыжкова В. А., Корец М. А.* Алгоритм автоматизированного картографирования современного состояния и динамики лесов на основе ГИС // Вестн. НГУ. Сер. Информ. техн. 2010. Т. 8. Вып. 4. С. 15–24.
- Исаченко А. Г.* Ландшафты СССР. Л.: Изд-во Ленинградск. ун-та, 1985. 320 с.
- Исаченко А. Г.* Ландшафтные типы лесных местопроизрастаний: определение, классификация, картографирование, характеристика // Устойчивое лесопользование и критерии его оценки в период перехода к рыночной экономике // Тр. СПбНИИЛХ. СПб., 1998. С. 161–183.
- Карионов Ю. И.* Оценка точности матрицы SRTM // Геопрофи. 2010. № 1. С. 48–51.
- Коротин А. С., Попов Е. В.* Оценка точности цифровых моделей рельефа, применяемых для территориальных исследований // ГРАФИ-КОН'2015. Тр. юбилейной 25-й Междунар. науч. конф. 2015. С. 102–106.
- Лесной план Хабаровского края на 2009–2018 годы. Утвержден постановлением губернатора Хабаровского края от 22 декабря 2008 г. № 175. <http://docs.cntd.ru/document/995125878>
- Марков Д. С.* Геоинформационный анализ ареала распространения ребристых морен в Ивановской области // Вестн. Удмуртск. ун-та. 2011. Вып. 2. С. 116–121.
- Нетребин П. Б.* Морфометрический анализ рельефа Большого Кавказа: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.25. Краснодар, 2012. 23 с.
- Общие принципы стратегии лесопользования и лесовыращивания на ландшафтно-типологической основе. Сб. науч. тр. СПбНИИЛХ. 1994. 134 с.
- Общее описание ASTER GDEM. Описание структуры и точности продукта, 2017. <http://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html>
- Основные геоморфометрические параметры: теория, 2017. <http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>
- Порядин В. С.* Стохастические модели в морфо-структурном анализе. М.: Недра, 1985. 152 с.
- 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) // Вестн. Брянск. гос. ун-та. 2010. № 4. С. 237–243.
- Сухих В. И.* Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МГТУ, 2005. 390 с.
- Сысуев В. В., Шарый П. А.* Выделение типов условий местопроизрастания для лесоустройства по участковому методу // Лесоведение. 2000. № 5. С. 10–19.
- Фарбер С. К.* Структуризация лесных сообществ // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 35–49.
- Фарбер С. К., Кузьмик Н. С., Брюханов Н. В.* Перспективы использования данных SRTM для решения лесных научно-практических задач // ГЕО-Сибирь-2013. Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью: сб. мат-лов IX Междунар. науч. конгр. 15–26 апреля 2013 г., Новосибирск. Т. 4. Новосибирск: СГГА, 2013. С. 85–88.
- Физическая география России и сопредельных территорий. Геопортал МГУ, 2017. <http://www.geogr.msu.ru:8082/FGR/>
- Фомин В. В., Залесов С. В.* Географо-генетический подход к оценке и прогнозированию лесных ресурсов с использованием ГИС-технологий // Аграрн. вестн. Урала. 2013. Т. 118. № 12. С. 18–24.
- Черниковский Д. М.* Анализ влияния количественных характеристик поверхности рельефа на структуру лесного растительного покрова разных регионов // Изв. лесотехн. акад. СПб.: ЛТА, 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., Шипилова Е. Ю.* Опыт оценки взаимосвязей морфометрических характеристик рельефа с характеристиками лесного растительного покрова с использованием цифрового моделирования рельефа и ГИС-технологий // Дистанционные методы и гео-

информационные технологии в науках о Земле и охране природы. Сб. ст. Вып. 2(3). СПб.: РГПУ–СПбГЛТУ, 2015. С. 56–66.

Шарапов И. П. Функции распределения высоты рельефа // Рельеф Земли и математика. М.: Мысль, 1967. С. 72–79.

Якименко Э. Л. Морфометрия рельефа и геология. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 201 с.

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 and Landforms*. 1987. V. 12. P. 47–56.

ASSESSMENT OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF RELIEF WITH QUANTITATIVE AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF FORESTS USING ASTER AND SRTM DIGITAL TERRAIN MODELS

D. M. Chernikhovsky

*St. Petersburg State Forest University
Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 194021 Russian Federation*

E-mail: cherndm2006@yandex.ru

In the article are shown results of assessment of relationships between quantitative and qualitative characteristics of forests and morphometric characteristics of relief on an example model plot in Nanayskoe forest district of Khabarovsk Territory. The relevance of the investigation is connected with need for improvement of the system of forest evaluation operations in the Russian Federation, including with use of the landscape approach. The tasks of the investigation were assessment of relationships between characteristics of relief and characteristics of forest vegetation cover on different levels of forest management; evaluation of morphometric characteristics of relief are important for structure and productivity of forests; comparison of the results obtained through the use of digital terrain models ASTER and SRTM. Geoinformatic projects were formed for a model plot on the basis of digital terrain models and data of forest mensuration and State (National) Forest Inventory. On the basis of the developed method with use geoinformatic technologies were estimated morphometric characteristics of relief (average height, standard deviation of height, entropy, exposition and gradient of slopes, indexes of ruggedness and roughness), quantitative and qualitative characteristics of forests. The multifactor regression analysis, where characteristics of forests (as dependent variables) and morphometric characteristics of relief (as independent variables) were used, have been done. As a result of research, the set of morphometric characteristics of relief able to influence to variability of quantitative and qualitative characteristics of forests was identified. The set of linear regression equations able to explain 30–50 % of variability of dependent variables was obtained. The regression equations, obtained on base of digital terrain models ASTER and SRTM, comparable to each other in strength of relations (coefficients of determination), but includes the different sets of morphometric characteristics. The results of the study suggest the presence of relationships between characteristics of forests and morphometric characteristics of relief on different levels of forest management.

Keywords: *morphometric characteristics of relief, forest mensuration, State forest inventory, geographic information technology, digital terrain models.*

How to cite: *Chernikhovsky D. M. Assessment of the relationships between morphometric characteristics of relief with quantitative and qualitative characteristics of forests using ASTER and SRTM digital terrain models // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Siberian Journal of Forest Science). 2017. N. 3: 28–39 (in Russian with English abstract).*