

УДК 630*181(182.5)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ ЮЖНО-ТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ ПРИАНГАРЬЯ¹

© 2021 г. С. К. Фарбер^а, *, Н. С. Кузьмик^а

^аИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50, стр. 28, Красноярск, 660036 Россия

*E-mail: sfarber@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 14.06.2018 г.

После доработки 24.03.2020 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

Потенциальная продуктивность древостоев рассматривается в зависимости от лесорастительных условий. Формируются множественные уравнения регрессии. Исходная информация — материалы лесоустройства и данные цифровой модели рельефа. В качестве зависимой переменной используется класс бонитета. В качестве аргументов принимаются характеристики теплообеспеченности, влажности местоположений и плодородия почв. Теплообеспеченность местоположений рассматривается как производное от показателей рельефа. Показатели влажности местоположений и плодородия почв конструируются на основе лесотаксационных описаний. Вне зависимости от категории земель каждый таксационный выдел получает как дополнительные характеристики, так и возможность последующего расчета потенциальной продуктивности древостоев. Выявлено, что вертикальный градиент температуры значимо отражается на представленности пород деревьев, но практически не влияет на продуктивность древостоев. Достоверное снижение класса бонитета по мере набора высоты наблюдается только у сосновых и еловых древостоев. Влияния экспозиции, величины уклона и кривизны поверхности на продуктивность древостоев не прослеживается. Напротив, выявлено наличие статистически значимой связи продуктивности древостоев с типами леса (влажностью местоположений) и типами почв (почвенным лесным плодородием). Демонстрируются карты потенциальной продуктивности сосновых, лиственничных, кедровых и еловых древостоев.

Ключевые слова: потенциальная продуктивность древостоев, рельеф и теплообеспеченность местоположений, тип леса, класс бонитета, влажность и плодородие почв.

DOI: 10.31857/S0024114821020030

В развитии лесного комплекса различают экстенсивный, интенсивный и переходный периоды (Петров и др., 1986). В регионах Сибири, где преобладают спелые и перестойные насаждения, в основном продолжается период экстенсивного освоения и потребления лесных ресурсов. Поскольку хозяйственное освоение лесов протекает территориально неравномерно, экономическая ситуация на отдельных территориях существенно различается. В экономически доступных районах южной тайги Сибири в результате длительной и интенсивной (начиная с 60-х годов XX в.) лесоэксплуатации, а также естественных причин (пожары и болезни леса) состояние лесосечного

фонда существенно ухудшилось. Нехватка древесных ресурсов объективно определяет экономическую ситуацию, при которой становится неизбежен переход к интенсивному развитию лесного комплекса. В частности, к таким территориям относятся лесные районы Приангарья. Здесь, на арендных участках лесозаготовительных предприятий уже обозначилось стремление к переходу на интенсивные методы хозяйствования. Принцип постоянства и неистощительности пользования лесом при этом должен неукоснительно выполняться. В противном случае неизбежен возврат к формам экстенсивного хозяйства, но перспективы поиска и последующей аренды дополнительных лесных массивов становятся все более проблематичными.

На вырубках и гарях лесовосстановление зачастую происходит со сменой на лиственные породы или задерживается на длительный период (Фарбер, 2000). Значимой составляющей периода интенсивного развития лесного хозяйства явля-

¹ Работа выполнена в рамках фундаментального научного исследования по Программе СО РАН VI.52.2. “Лесные экосистемы Сибири: адаптивный потенциал биосферных и ресурсных функций при различных сценариях климатических и антропогенных воздействий” (0356-2017-0738, номер госрегистрации АААА-А17-117101940014-9).

ется своевременное лесовосстановление на не покрытых лесом землях и выращивание целевых древостоев определенного породного состава и продуктивности. При выполнении этого условия будет достигаться и непрерывное продуцирование древесного ресурса. В настоящее время проектные решения о проведении тех или иных лесовосстановительных мероприятий принимаются по факту наличия погибших насаждений, вырубок и выделов. Материалы лесоустройства содержат необходимую для проектирования информацию. Однако определение целевой древесной породы не имеет достаточного научного обоснования. На участках потенциально могут произрастать различные по породному составу древостои, а целевая порода определяется произвольно. Наличие дополнительной информации о связи продуктивности пород деревьев с лесорастительными условиями по отдельным таксационным выделам поможет избежать субъективности выбора.

Современные методы обработки данных предоставляют дополнительные возможности моделирования и пространственного анализа. В полной мере это относится к показателям рельефа и данным лесоустройства, в том числе применительно к оценке лесорастительных условий. Появляется возможность выявления потенциальной продуктивности древесных пород вне зависимости от категории земель. Цель работы — определение и картографирование потенциальной продуктивности (классов бонитета) древесных пород, в том числе на не покрытых лесом землях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исходные материалы:

- данные массовой таксации — 1765 описаний таксационных выделов;
- ЦМР (тестовый участок расположен в пределах трапеции SRTM 56-01);
- схема типов леса и нелесных сообществ.

Число лесотаксационных выделов сосновых древостоев составило 219, лиственных — 731, кедровых — 478, еловых — 93.

Тип леса характеризует лесорастительные условия (комплекс климатических, орографических, гидрологических и почвенных факторов) на качественном уровне. В качестве количественного измерителя продуктивности древостоя используется класс бонитета, зависящий от лесорастительных условий (Лесное хозяйство ..., 2002). Совместное рассмотрение типа леса и класса бонитета считается взаимодополняющей качественной и количественной оценкой продуктивности древостоев и лесорастительных условий.

Продуктивность древостоев определяется посредством многофакторных регрессионных уравнений. В качестве функции принимается класс бони-

тета. Значения классов бонитета кодируются посредством порядковых чисел. Классы бонитета Va и Vb кодируются значениями 6 и 7. В качестве аргументов принимаются показатели лесорастительных условий, проверенные на наличие связи с продуктивностью древостоев. Основные факторы, влияющие на рост и состояние насаждений, — теплообеспеченность местоположений, степень их увлажнения, а также почвенное плодородие. Для формирования регрессионных уравнений использован программный пакет STATISTICA. Уровень значимости принят равным 0.95. Результаты количественной оценки лесорастительных условий и расчетов потенциальной продуктивности древостоев вносятся в соответствующие поля атрибутивной таблицы ГИС, что определяет возможность их последующего картографирования.

Оценка продуктивности древостоев по показателям рельефа (теплообеспеченности местоположений). Пространственный анализ рельефа проведен средствами ГИС (ArcGIS, модуль Spatial Analyst). Рассматриваются показатели, которые можно получить посредством анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) (абсолютная высота, экспозиция, уклон, кривизна поверхности). Использована ЦМР в виде данных матрицы SRTM (Kargel, Ewiak, 2008). Погрешности ЦМР, возникающие за счет наличия растительного покрова, не учитываются. Приняты следующие градации показателей рельефа: *H* (абсолютная высота) — интервал 30 м; *Asp* (экспозиция) — интервал 30°; *Sl* (уклон) — интервал 2°; *Cur* (кривизна поверхности) — интервал 0.3 единиц кривизны.

Полученным интервалам показателей рельефа присвоены индексы в виде порядковых чисел. При формировании уравнений необходимо также учитывать особенности влияния экспозиции. Поскольку симметричные относительно оси “север—юг” местоположения (западные и восточные) в действительности получают одинаковое количество тепла, последовательное увеличение индекса экспозиции будет методически неверно. Чтобы избежать необходимости формирования отдельных уравнений для склонов северных и южных экспозиций, румбам, симметричным относительно направления “север—юг”, присвоен одноименный индекс экспозиции. Плоские местоположения занимают промежуточное положение.

Характеристики растительного покрова находятся в зависимости от годовой суммы активных температур (Поликарпов и др., 1986; Седельников и др., 2005). Перераспределение тепла, поступающего к поверхности Земли, связано с показателями рельефа и происходит по следующим закономерностям:

- по мере увеличения абсолютной высоты выражена тенденция уменьшения температуры;

– южные склоны прогреваются сильнее северных;

– увеличение крутизны южного склона повышает, а северного, напротив, понижает количество тепла;

– изменение температуры в зависимости как от высот местности, так и величин уклонов непрерывно и прямолинейно.

При выявлении сопряженности характеристик лесного покрова с лесорастительными условиями количество тепла можно заменить показателями рельефа местности (Фарбер и др., 2017). Таким образом, теплообеспеченность местоположений определяется опосредованно, через показатели рельефа. При этом следует признать, что адекватность такого рода замены оценить вряд ли возможно. При наличии связи формируется уравнение регрессии $B_r = f(H, Asp, SI)$, где B_r – класс бонитета древостоя, зависящий от характеристик рельефа (теплообеспеченности местоположений).

Оценка продуктивности древостоев по индексу влажности местоположений. Степень увлажнения местоположений определяется в экспертном порядке. По описанию лесотаксационных выделов производится их сопоставление, с получением ранжированного по влажности ряда типов леса. Оценка комплексная, анализируется таксационное описание выдела и данные макета дополнительных сведений. Информация для анализа – тип леса, породный состав, класс бонитета, почва (название, механический состав, степень влажности). По отношению к типам леса принимается последовательное увеличение порядкового номера в ряду от сухих к более увлажненным местоположениям. Порядковый номер в ряду отождествляется с индексом влажности почв (Фарбер и др., 2017).

Индекс влажности определяется для всех лесотаксационных выделов. Для погибших насаждений влажность выявляется в сравнении с выделами, занимающими аналогичные местоположения (Фарбер, 1997). Далее индекс влажности используется в качестве независимой переменной в уравнениях регрессии продуктивности древесных пород. Общий вид уравнений $B_w = f(W)$, где W – порядковый номер в ранжированном ряду влажности почв, B_w – класс бонитета, зависящий от влажности местоположений.

Оценка продуктивности древостоев по показателю плодородия почв. Содержание питательных веществ, кислотность, степень влажности отличаются по видам почв. По отношению к древесным породам обобщенной характеристикой почв является их плодородие. Таксационные показатели насаждений зависят от лесорастительных условий и поэтому в определенной степени характеризуют в том числе и плодородие почв. Можно допустить, что верно и обратное: плодородие может оцениваться (измеряться) посредством лесотаксацион-

ных показателей. Принимается, что класс бонитета древостоя – производное лесорастительных условий, в перечень которых входит в том числе плодородие лесных почв. Можно записать: $B_s = f(S)$, где B_s – класс бонитета древостоя, зависящий от плодородия почв; S – показатель лесорастительных условий (в том числе плодородия почв). Класс бонитета древостоя и наименование (тип) почвы фигурируют в описании таксационного выдела в качестве характеристик. Для получения зависимости $B_s = f(S)$ остается определиться с конструкцией показателя лесорастительных условий.

Возможность сравнения появляется при использовании заранее оговоренной линии отсчета. В качестве показателя лесорастительных условий ранее было предложено отношение d/d_0 , где $d_0 = f(h)$; d, h – диаметр и высота главной породы древостоя; d_0 – значение диаметра на линии уравнения, соответствующее значению высоты h_0 (Фарбер, 1997, 2000). Вообще же преимущество за показателем, варьирующим менее других. Поэтому в качестве измерителя лесорастительных условий лучше использовать не отношение диаметров d/d_0 , а отношение высот h/h_0 . Тогда в качестве линии отсчета будет выступать усредненная линия роста по высоте (уравнение регрессии $h_0 = f(A)$, где A – возраст древостоя, лет). Посредством введения дополнительного аргумента точность оценки h_0 повышается. По признаку наименьшего варьирования в качестве дополнительного аргумента используется диаметр. Тогда $h_0 = f(d, A)$, при этом началом отсчета будет уже не линия, а плоскость.

Последовательность оценки продуктивности древостоев по индексу плодородия почв:

– получение для древесных пород уравнений регрессии $h_0 = f(d, A)$;

– вычисление значений индексов плодородия почв $S = h/h_0$, с внесением в атрибутивную таблицу ГИС;

– вычисление для древесных пород и типов почв средних значений индексов плодородия почв $S_i = \sum S/n$;

– вычисление общего для всех пород деревьев и типов почв средневзвешенных значений индексов плодородия почв $S_0 = \sum (S_i n_i)/N$, где $N = \sum n_i$;

– получение для древесных пород уравнений регрессии $B_s = f(S_0)$.

Оценка продуктивности древостоев по показателю рельефа (теплообеспеченности), влажности и плодородия. Формируются многофакторные уравнения регрессии. В качестве предикторов используются значения B_r, B_w, B_s таксационных выделов. Общий вид зависимости $B_0 = f(B_r, B_w, B_s)$, где B_0 – класс бонитета, зависящий от показателей рельефа (теплообеспеченности), влажности и плодородия местоположений.

Эвенкийский автономный округ (Байкитское лесничество)

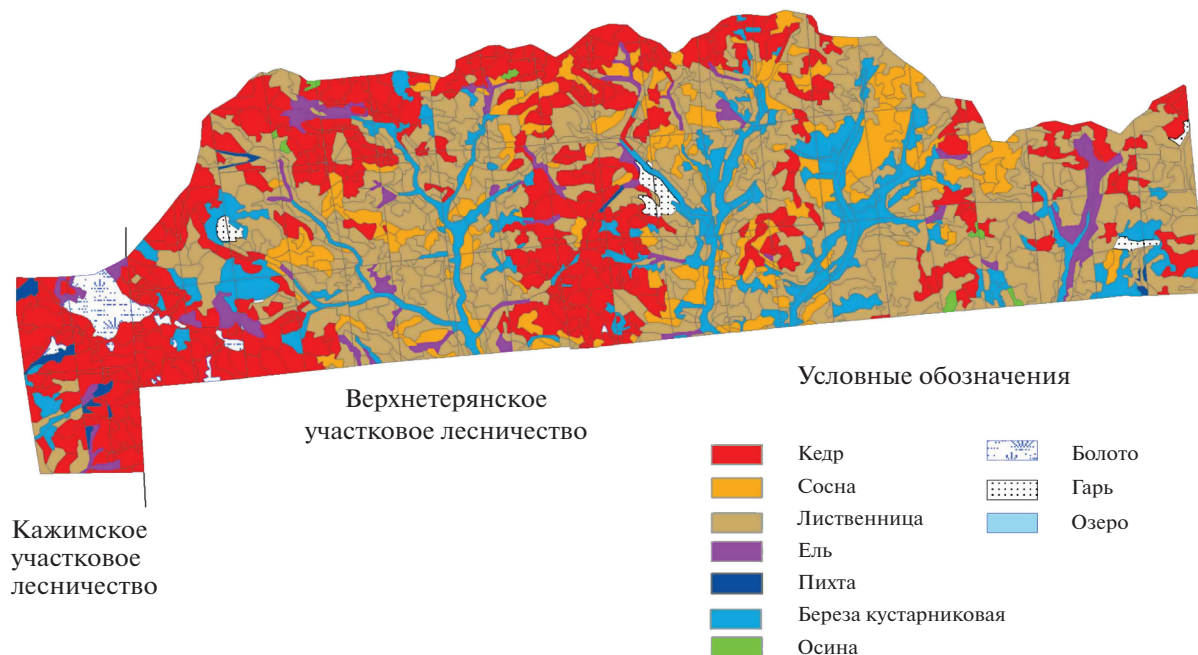


Рис. 1. Фрагмент плана лесонасаждений тестового участка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тестовый участок расположен в Красноярском Приангарье на территории Терянского лесничества (Верхнотерянский участковый лесничества, кварталы 1–53 и Кажимское участковое лесничество, кварталы 93, 94, 118, 119) (рис. 1). Лесоустройство Терянского лесничества проводилось в 2005 г. по 3-му разряду. На севере тестовый участок по линии водораздела Ангара и Подкаменной Тунгуски граничит с Байкитским лесничеством Эвенкии. Здесь расположены истоки рек и ручьев, впадающие в Ангару с севера, из них наиболее крупные – Верхняя Теря и Микчанда. Абсолютные высоты изменяются от 340 м на юге до 700 м на севере. Общий перепад абсолютных высот составляет 360 м. Средний уклон равен 3.6° ($\sigma = \pm 2.3^\circ$).

На тестовом участке явно выделяется 200-летняя и более генерация перестойных древостоев. Меньшая часть древостоев представлена возрастом 70–80 лет. Повторяемость пожаров и продолжительность межпожарных интервалов характеризует пирологические режимы природных комплексов, влияющие на процессы лесообразования (Фуряев, 1996). Наличие в пределах тестового участка четко обособленных возрастных генераций древостоев, позволяет предположить широкое распространение лесных пожаров в годы, предшествующие массовому лесовосстановлению. Породный состав древостоев, лесотипологическая структура и пространственное размещение

связаны с особенностями почвенно-грунтовых условий верхней части южного макросклона бассейна Ангара. Поймы рек и ручьев заболочены и заняты ерниками. Ельники распространены незначительно и приурочены к подножиям холмов. Сосняки занимают более сухие местоположения в основном на выпуклых водоразделах, средних и верхних частях склонов. На тестовом участке преобладают лиственничники и кедровники. Доля пихтовых насаждений незначительна.

Зависимость продуктивности древостоев от рельефа (теплообеспеченности). В результате пространственного анализа рельефа тестового участка для таксационных выделов получены значения H , Asp , Sl , Cur . Теснота связи оценивается посредством коэффициента корреляции Пирсона R . Считается, что при $|R| \leq 0.25$ корреляция слабая, $0.25 \leq |R| \leq 0.75$ – умеренная, $|R| > 0.75$ – сильная (Реброва, 2003).

Рельеф тестового участка – равнинный, местами всхолмленный, что характерно и в целом для территории Приангарья. Оказалось, что корреляция классов бонитета древостоев с показателями рельефа в основном отсутствует. Умеренная корреляция наблюдается только с абсолютной высотой у сосняков и ельников (табл. 1). Для них с увеличением абсолютной высоты местности класс бонитета снижается. Кедр и лиственница – породы деревьев, адаптированные как к теплым, так и холодным климатическим условиям. Полагаем, именно поэтому перепад абсолютных высот на

Таблица 1. Линейная корреляция классов бонитета с показателями рельефа

Древостой	R_H/p	R_{Asp}/p	R_{Sl}/p	R_{Cur}/p
Сосняк	0.293/0.000	−0.028/0.683	−0.091/0.182	−0.039/0.565
Лиственничник	−0.105/0.005	0.084/0.023	−0.032/0.387	−0.249/0.501
Кедровник	0.067/0.146	0.062/0.173	−0.117/0.011	0.121/0.008
Ельник	0.284/0.006	−0.121/0.250	0.043/0.679	0.125/0.234

Примечание. Числитель — коэффициенты корреляции: R_H — корреляция высоты, R_{Asp} — корреляция экспозиции, R_{Sl} — корреляция уклона, R_{Cur} — корреляция кривизны поверхности; знаменатель — уровень достоверности p -level.

Таблица 2. Распределение типов леса по влажности почв

Древостой	Влажность почв, индекс											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сосняк	лш	лшбр	брзм	брос, бррт	ос, ртос	чзм						
Лиственничник					брзм, брос, бррт	ос, ртос	чзм	хвв, хвзм	осдм	бгол		
Кедровник						бррт, брос, брзм	ртос, ос	чзм	хвзм	осдм	бгол	бгсф
Ельник							бррт	ртос	хвв, хвзм	осдм	бгол	бгсф
Пихтарник								ртос, ос	хвзм	осдм		
Березняк			брзм	бррт	ртос	ос	чзм	хвзм	осдм	бгол		
Осинник						ос	чзм					

Примечание. лш — лишайниковый, лшбр — лишайниково-брусничный, брзм — бруснично-зеленомошный, бррт — бруснично-разнотравный, ос — осочковый, брос — бруснично-осочковый, ртос — разнотравно-осочковый, чзм — чернично-зеленомошный, хвв — хвощово-вейниковый, хвзм — хвощово-зеленомошный, осдм — осочково-долгомошный, бгол — багульниково-ольховниковый, бгсф — багульниково-сфагновый.

тестовом участке на продуктивности кедровников и лиственничников заметно не сказывается.

Ориентируясь на значения коэффициентов корреляции из показателей рельефа в качестве предиктора, в уравнениях выбирается H , и только для сосновых и еловых древостоев. Получены уравнения регрессии:

$$- \text{сосняки} - B_r = 3.242 + 0.013H^2 (R^2 = 0.181);$$

$$- \text{ельники} - B_r = 3.992 + 0.098H (R^2 = 0.081).$$

Оказалось, что влияние всхолмленного рельефа на перераспределение тепла незначительно, и различие в теплообеспеченности местоположений не настолько велико, чтобы статистически значимо влиять на продуктивность древесных пород. Можно ожидать, что с увеличением крутизны склонов и перепадов абсолютных высот теплообеспеченность отдельных местоположений будет различаться сильнее.

Зависимость продуктивности древостоев от индекса влажности. В упрощенном виде ранжированный ряд влажности почв демонстрируется относительно обобщенного качественного показателя лесорастительных условий — типа леса (табл. 2).

Связь продуктивности древостоев с индексом влажности местоположений описывается уравнениями:

$$- \text{сосняки} - B_w = 5.804 - 1.073W + 0.116W^2 (R^2 = 0.136);$$

$$- \text{лиственничники} - B_w = 6.004 - 0.920W + 0.068W^2 (R^2 = 0.164);$$

$$- \text{кедровники} - B_w = 6.234 - 0.543W + 0.033W^2 (R^2 = 0.028);$$

$$- \text{ельники} - B_w = 0.905 + 0.351W (R^2 = 0.436).$$

Теснота связи влажности местоположений с продуктивностью сосновых, лиственничных и еловых древостоев умеренная, с продуктивностью кедровых — слабая.

Насаждения тестового участка произрастают при определенной влажности. Сосняки занимают местоположения с баллами влажности от 1 до 7; лиственничники — от 5 до 10; кедровники — от 6 до 12; ельники — от 7 до 12. Еще более влажные местоположения занимают заболоченные кустарники. Получается, что влажность лимитирует возможность произрастания пород деревьев, и

этот факт далее используется при картографировании потенциальной продуктивности древесных пород. Так, местоположения с баллами влажности 1–6, 11 и более в качестве потенциально возможных для произрастания лиственницы выпадают.

Зависимость продуктивности древостоев от показателя плодородия почв.

Для древесных пород получены следующие уравнения регрессии вида $h_0 = f(d, A)$:

– сосняки – $h_0 = -0.842 + 1.264d - 0.017d^2$ ($R^2 = 0.761$);

– лиственничники – $h_0 = 1.387 + 0.020A + 1.037d - 0.013d^2$ ($R^2 = 0.601$);

– кедровники – $h_0 = 5.106 + 0.708d - 0.007d^2$ ($R^2 = 0.268$);

– ельники – $h_0 = 0.431 + 1.188d - 0.014d^2$ ($R^2 = 0.895$).

На основе уравнений $h_0 = f(d, A)$ рассчитаны значения $S = h/h_0$ и внесены в дополнительное поле атрибутивной таблицы таксационных выделов. Далее последовательно рассчитаны показатели лесорастительных условий S_i и S_0 (табл. 3). Показатель S_i относится к одному наименованию почвы для i -й древесной породы. Соответственно оценка плодородия почв (и картирование) на основе S_i возможна только для таксационных выделов i -й древесной породы. Показатель S_0 относится ко всем древесным породам. Соответственно оценка плодородия почв (и картирование) на основе S_0 уже возможна на основании наименования почвы для всех таксационных выделов, включая выделы лиственных древостоев (березняки и осинники), выделы погибших насаждений, вырубки.

Уравнения регрессии вида $B_s = f(S_0)$ получены по данным классов бонитета древостоев и показателям почвенного плодородия S_0 таксационных выделов:

– сосняки – $B_s = -13.764 - 31.597S^2 + 48.890S$ ($R = 0.513$, $R^2 = 0.263$);

– лиственничники – $B_s = 50.597 - 87.021S + 39.459S^2$ ($R = 0.412$, $R^2 = 0.170$);

– кедровники – $B_s = -10.202 - 21.751S^2 + 36.063S$ ($R = 0.321$, $R^2 = 0.103$);

– ельники – $B_s = 240.110 - 467.974S + 232.201S^2$ ($R = 0.378$, $R^2 = 0.143$).

Плодородие почв возрастает от сухих к дренированным и от переувлажненных заболоченных почв к дренированным. Более производительные древостои произрастают на дренированных почвах, влажность которых оптимальна. В пределах тестового участка различие в механическом составе почв значимо не сказывается на продуктив-

ности разнотравных и зеленомошных древостоев. Здесь почвы безотносительно к древесным породам более плодородные. При натурной таксации предоставляется возможность непосредственного наблюдения обнажившихся по ряду причин почвенных горизонтов, что позволяет диагностировать тип почвы. При дешифровочной таксации описание почв основано на косвенных признаках. Однако несмотря на очевидную субъективность оценок почвенных описаний, на тестовом участке наблюдается наличие статистически значимой связи таксационных показателей древостоев с типами почв. Можно предположить, что реальная взаимосвязь еще более высокая.

Общая зависимость продуктивности древостоев от показателей рельефа, индексов влажности и показателей плодородия. Получены следующие уравнения вида $B_0 = f(H, W, S_0)$:

– сосняки – $B_0 = 7.910 - 7.470S_0^2 + 0.092H - 0.176W^2 + 1.422W$ ($R^2 = 0.387$);

– лиственничники – $B_0 = 69.119 - 124.701S_0 - 0.005H^2 + 60.779S_0^2 + 0.063H + 0.050W^2 - 0.704W$ ($R^2 = 0.217$);

– кедровники – $B_0 = -4.599 - 15.368S_0^2 + 0.015H^2 - 0.203H + 23.446S_0 + 0.285W - 0.016W^2$ ($R^2 = 0.130$);

– ельники – $B_0 = 91.285 - 0.566W - 165.140S_0 + 0.007H^2 + 79.359S_0^2 + 0.043W^2$ ($R^2 = 0.540$).

Таким образом, потенциальная производительность древостоев зависит в основном от влажности местоположений и почвенного плодородия. Значимость показателей рельефа незначительна. Линейная корреляция наблюдается только с абсолютной высотой местности. Согласно полученным зависимостям, потенциальная продуктивность древесных пород меняется синхронно. На лучших по режиму увлажнения и плодородию почвах на прогреваемых участках могут произрастать более производительные древостои. В пределах тестового участка наблюдается увеличение показателя B_0 в южном направлении (по мере снижения абсолютной высоты местности). Поймы рек, ручьев заболочены и заняты кустарниками. Выровненные террасы и нижние вогнутые части склонов с глубокими дренированными почвами для древостоев хвойных пород благоприятны. Древесные породы приурочены к определенным местоположениям, что является следствием различного отношения к факторам среды. Ведущее значение имеют особенности форм рельефа, гидрологического режима, плодородия почв. Кедровые насаждения адаптированы к более высоким водораздельным пространствам и нижним частям склонов, ельники – к долинам рек; сосняки произрастают на песчаных и супесчаных почвах. При этом достаточ-

Таблица 3. Распределение S_i и S_0 по наименованиям почв

Название почвы	Древесная порода												S ₀
	сосна			лиственница			кедр			ель			
	n	B _{ср}	S _i	n	B _{ср}	S _i	n	B _{ср}	S _i	n	B _{ср}	S _i	
Переговойная, иловато-глеевая, легкосуглини- стая, влажная				4	3.25	1.05	2	4.00	1.10	35	3.71	1.00	1.01
Дерново-слабоподзолистая, легкосуглинистая, свежая	69	3.48	1.00	345	3.03	1.00	74	4.03	1.00	3	4.33	0.96	1.00
Переговойная, подзолисто-глеевая, легкосугли- нистая, влажная										6	4.67	0.99	0.99
Слабоподзолистая, легкосуглинистая, влажная	1	3.00	1.03	4	3.00	1.04	339	4.13	1.00	13	4.92	1.00	1.00
Слабооподзоленная, легкосуглинистая, сырая				1	4.00	0.88	10	4.30	0.95	1	5.00	0.92	0.94
Торфянисто подзолисто-глеевая, легкосуглини- стая, влажная				34	3.66	0.94	1	5.00	0.83	10	5.00	0.98	0.95
Торфянисто-глеевая, легкосуглинистая, сырая										8	5.00	1.01	1.01
Торфянисто-глеевая, легкосуглинистая, влаж- ная										9	5.00	1.00	1.00
Торфянисто-глеевая, среднесуглинистая, сырая										2	5.00	1.05	1.05
Торфянисто-глеевая, среднесуглинистая, влаж- ная										6	5.00	1.05	1.05
Оподзоленная, легкосуглинистая, свежая							13	3.62	1.05				1.05
Оподзоленная, легкосуглинистая, влажная							3	3.67	1.07				1.07
Дерново-среднеподзолистая, легкосуглинистая, свежая	136	3.55	1.01	312	3.03	1.00	3	4.00	1.04				1.00
Торфянистая, легкосуглинистая, сырая							4	4.00	0.99				0.99
Дерново-среднеподзолистая, легкосуглинистая, влажная				4	3.25	0.95	3	4.33	0.97				0.96
Слабооподзоленная, легкосуглинистая, свежая							10	4.40	0.98				0.98
Торфянистая, легкосуглинистая, влажная							11	4.64	0.89				0.89
Дерново-слабооподзоленная, легкосуглини- стая, влажная				7	3.86	0.91	5	4.80	0.90				0.91
Дерново-оподзоленная, легкосуглинистая, влажная				18	2.94	1.03							1.03
Торфяно-подзолисто-глеевая, легкосуглини- стая, сырая				1	4.00	0.91							0.91
Торфяно-переговойно-глеевая, легкосуглини- стая, влажная				1	4.00	0.96							0.96
Дерново-черноземовидная, легкосуглинистая, свежая	2	3.00	1.05										1.05
Дерново-слабоподзолистая, супесчаная, свежая	2	4.50	0.90										0.90
Дерново-слабоподзолистая, супесчаная, сухая	7	4.86	0.89										0.89
Мелкоземная, каменистая, среднесуглини- стая, сухая	2	5.00	0.80										0.80

Примечание. B_{cp} — средний класс бонитета; S_i — среднее значение отношения h/h_0 для древесной породы; S_0 — общее для древесных пород средневзвешенное значение отношения h/h_0 .

Эвенкийский автономный округ (Байkitское лесничество)

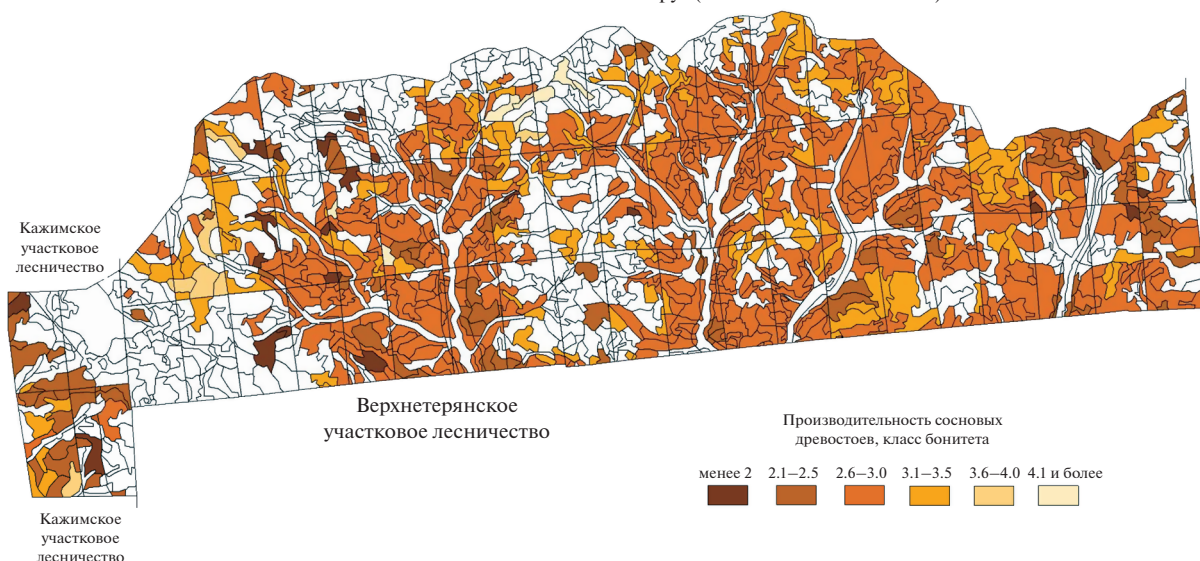


Рис. 2. Потенциальная продуктивность сосновых древостоев. Масштаб 1 : 150000.

но широкому диапазону лесорастительных условий отвечают древостои разных пород. Именно это обстоятельство и позволяет выбирать целевую породу для определенного участка.

Картографирование потенциальной продуктивности древостоев B_0 произведено по значени-

ям полей атрибутивной таблицы ГИС (табл. 4, рис. 2–5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что оценка и картографирование потенциальной продуктивности древесных пород

Таблица 4. Данные атрибутивной таблицы ГИС таксационных выделов Верхнеретянского участкового лесничества (фрагмент)

Показатели таксационного выдела					Лесорастительные условия, индекс			Потенциальная продуктивность древостоев B_0 , класс бонитета			
тип леса	A	h	d	B	H	W	S_0	сосна	лиственница	кедр	ель
Лбрзм	230	24	32	3	2	5	1	3.3	3.0		
Сртос	200	21	28	4	7	5	1	3.8	3.1		
Косдм	220	21	32	4	7	10	1		3.3	4.1	4.5
БКСоссф											
Лос	190	24	36	3	3	6	1	2.9	2.9	4.1	
Кчзм	190	19	24	4	5	8	1.05		2.9	3.7	3.8
Лос	240	25	40	3	6	6	1	3.2	3.0	3.9	
Лос	210	24	32	3	6	6	1	3.2	3.0	3.9	
Бос	70	16	14		9	6	1	3.5	3.0	4.0	
Лбгол	210	20	22	4	3	10	0.95		3.6	4.6	4.7
Ебгсф	170	18	18	5	4	12	1.01			4.0	5.0
Лбрзм	230	24	36	3	7	5	1	3.8	3.1		
Лос	230	25	36	3	7	6	1	3.3	3.0	3.9	

Примечание. Лбрзм – лиственничник бруснично-зеленомошный, Сртос – сосняк разнотравно-осочковый, Косдм – кедрово-долгомошный, БКСоссф – береза кустарниковая осочково-сфаговая, Лос – лиственничник осочковый, Кчзм – кедрово-чернично-зеленомошный, Бос – березняк осочковый, Лбгол – лиственничник багульниково-голубичный, Ебгсф – ельник багульниково-сфаговый. A – возраст, лет; h – высота, м; d – диаметр, см; B – класс бонитета; H – абсолютная высота, м; W – порядковый номер в ранжированном ряду влажности почв; S_0 – показатель лесорастительных условий.

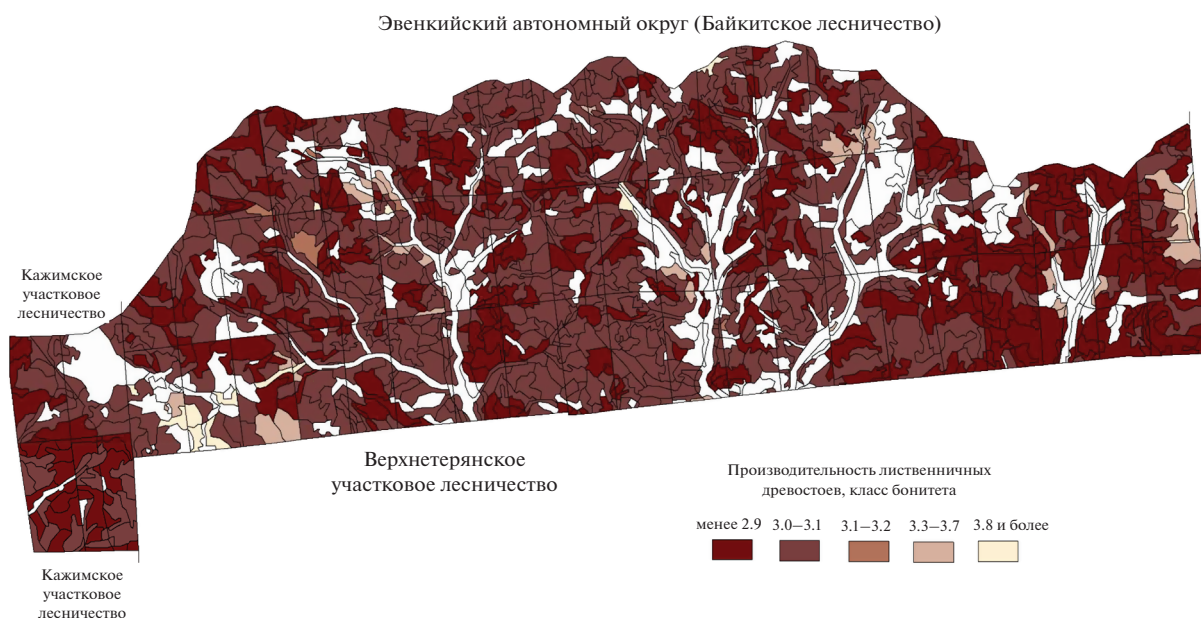


Рис. 3. Потенциальная продуктивность лиственных древостоев. Масштаб 1 : 150000.

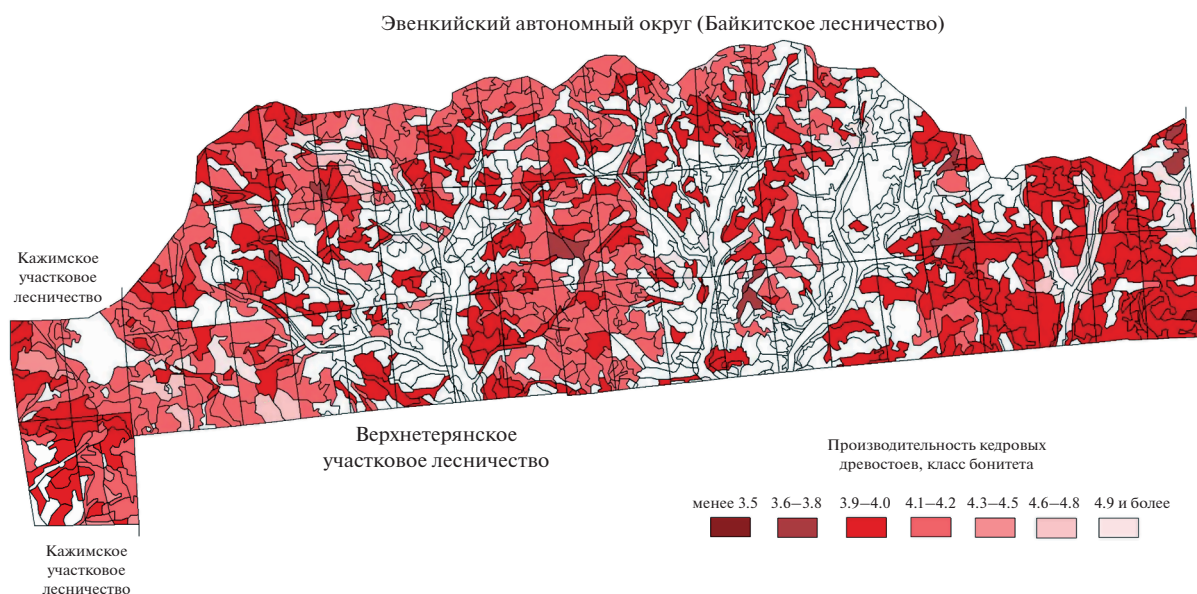


Рис. 4. Потенциальная продуктивность кедровых древостоев. Масштаб 1 : 150000.

может производиться через взаимосвязи с факторами среды. Для преимущественно перестойных древостоев тестового участка, находящихся в состоянии распада, продуктивность древостоев оказалась связана с абсолютной высотой местности, влажностью местоположений и плодородием почв. Расчет аналитического вида уравнений регрессии произведен программными средствами STATISTICA, пространственный анализ показателей рельефа произведен программными сред-

ствами ArcGIS Spatial Analyst. Характеристики лесорастительных условий в атрибутивной таблице ГИС таксационных выделов по мере уточнения могут редактироваться с последующим пересчетом аналитического вида уравнений регрессии. Кроме того, при составлении уравнений существует также возможность использования дополнительных аргументов.

Точность оценок лесорастительных условий напрямую зависит от исходных данных. В работе

Эвенкийский автономный округ (Байkitское лесничество)

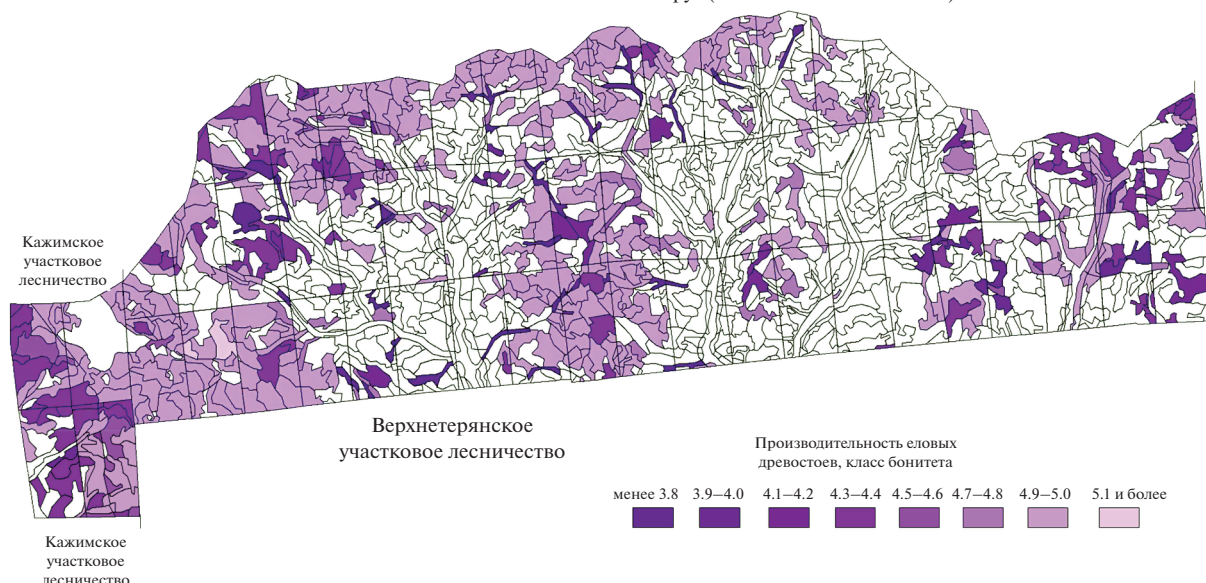


Рис. 5. Потенциальная продуктивность еловых древостоев. Масштаб 1 : 150000.

использованы данные массовой таксации, которые сами содержат погрешности, а таксационный выдел не имеет строгой привязки к экспозиции и уклонам местности. При определении индекса влажности местоположений особо важное значение приобретает тип леса, который достаточно уверенно определяется в процессе натурной таксации. При дешифровочной таксации тип леса определяется по косвенным признакам, т.е. дешифрируется с определенными трудностями (Дмитриев и др., 1976) и, как следствие, сопровождается ошибками. Отметим также, что почвы на территории тестового участка подробно не изучены, что затрудняло определение типа почв при таксации. Исследованиям почв, конечно, следует уделять большее внимание. Из литературы известны упрощенные методики. Так, И.В. Флоринский (2009) описывает способ получения прогнозных карт физических, химических и биологических характеристик почв, основанный на использовании ЦМР и результатов наземных почвенных съемок.

Картографирование потенциальной продуктивности древостоев произведено по значениям полей B_0 атрибутивной таблицы ГИС таксационных выделов. По другим полям таблицы существует возможность картографирования других показателей выделов, в том числе показателей лесорастительных условий: абсолютной высоты H , влажности местоположений W и плодородия почв S_0 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дмитриев И.Д., Данюлис Е.П., Кропов П.А. Лесная аэро-съемка и авиация. Лесотаксационное и лесохозяйственное дешифрирование аэроснимков. Л.: Изд-во Лесотехнической академии им. С.М. Кирова, 1976. 168 с.

Лесное хозяйство: Терминологический словарь / Под общ. ред. Филипчука А.Н. М.: Всерос. научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2002. 480 с.

Петров А.П., Бурдин Н.А., Кожухов Н.И. Лесной комплекс (Вопросы теории и практики). М.: Лесн. пром-сть, 1986. 296 с.

Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 225 с.

Реброва О.Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: Медиа Сфера, 2003. 305 с.

Седельников В.П., Лапицина Е.И., Королюк А.Ю., Валуцкий В.И., Ермаков Н.Б., Ершова Э.А., Макунина Н.И., Мальцева Т.В. Среднемасштабное картирование растительности гор Южной Сибири // Сибирский экологический журн. 2005. Т. 12. № 6. С. 939–953.

Фарбер С.К. Лесные измерения по среднемасштабным аэроснимкам. Красноярск: Изд-во СО РАН, 1997. 106 с.

Фарбер С.К. Формирование древостоев Восточной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 432 с.

Фарбер С.К., Кошкарлова В.Л., Кузьмик Н.С. Картографирование лесных формаций голоцена с использованием основных показателей климата – тепла и влаги // Сибирский лесной журн. 2017. № 6. С. 6–40.

Флоринский И.В. Картографирование почвы на основе цифрового моделирования рельефа (по данным кинематических GPS съемок и почвенных наземных съемок) // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 56–65.

Фурьяев В.В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 253 с.

Karwel A.K., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008. V. XXXVII. Pt B7. P. 169–172.

Tree Species Potential Productivity Modeling on the Example of the Southern Taiga of the Angara Region

S. K. Farber^{1,*} and N. S. Kuz'mik¹

¹Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Academgorodok, 50, bldg. 28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

*E-mail: sfarber@ksc.krasn.ru

The potential productivity of forest stands is considered depending on the forest growing conditions. Multiple regression equations are formed. Initial information are the forest inventory materials and digital elevation model data. Growth class is used as a dependent variable. The characteristics of heat supply, humidity of locations and soil fertility are taken as arguments. The locations' heat supply is considered as a derivative of the relief indicators. Indicators of moisture content of locations and soil fertility are constructed on the basis of forest inventory descriptions. Regardless of the land category, each taxation unit receives both additional characteristics and the possibility of subsequent calculation of the forest stands' potential productivity. It was revealed that the vertical temperature gradient significantly affects the tree species representation, but practically does not affect the forest stands' productivity. A significant decrease in the growth class with the rise in height is observed only in pine and spruce stands. The influence of exposure, slope and surface curvature on the forest stands productivity was not found. On the contrary, the presence of a statistically significant correlation between the productivity of forest stands and forest types (humidity of locations) and soil types (forest soil fertility) was revealed. The maps of the potential productivity of pine, larch, cedar and spruce stands are presented as well.

Keywords: forest stands potential productivity, relief and heat supply of locations, forest types, growth class, humidity and fertility of soils.

Acknowledgements: The work has been carried out within the framework of a basic scientific research of a SB RAS Programme VI.52.2. "Forest ecosystems of Siberia: biospheric and resource functions' adaptive potential in different climatic and anthropogenic scenarios" (0356-2017-0738, state registry number AAAA-A17-117101940014-9).

REFERENCES

- Dmitriev I.D., Danyulis E.P., Kropov P.A., *Lesnaya aeros'emka i aviatsiya. Lesotaksatsionnoe i lesokhozyaistvennoe deshifirovanie aerosnimkov* (Forest aerial photography and aviation. Forest inventory and forestry interpretation of aerial photographs), Leningrad: Izd-vo Lesotekhnicheskoi akademii im. S.M. Kirova, 1976, 168 p.
- Farber S.K., *Formirovanie drevostoev Vostochnoi Sibiri* (Formation of crops of Eastern Siberia), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000, 432 p.
- Farber S.K., Koshkarova V.L., Kuz'mik N.S., Kartografirovanie lesnykh formatsii golotsena s ispol'zovaniem osnovnykh pokazatelei klimata – tepla i vlagi (Mapping the Holocene forest formations with the use of key climate indicators – heat and moisture), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 6, pp. 6–40.
- Farber S.K., *Lesnye izmereniya po srednemasshtabnym aerosnimkam* (Forest measurements from mid-scale aerial photographs), Krasnoyarsk: Izd-vo SO RAN, 1997, 106 p.
- Florinskii I.V., Kartografirovanie pochvy na osnove tsifrovogo modelirovaniya rel'efa (po dannym kinematicheskikh GPS s'emok i pochvennykh nazemnykh s'emok) (Soil mapping based on digital terrain modeling (using data from kinematic GPS surveys and soil surveys)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 6, pp. 56–65.
- Furyaev V.V., *Rol' pozharov v protsesse lesoobrazovaniya* (The role of fires in the process of forest formation), Novosibirsk: Nauka, 1996, 253 p.
- Karwel A.K., Ewiak I., Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland, In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, Vol. XXXVII, Pt. B7, pp. 169–172.
- Lesnoe khozyaistvo: Terminologicheskii slovar'*, (Forestry: dictionary of terms), Moscow: Vseros. nauchno-issledovatel'skii institut lesovodstva i mekhanizatsii lesnogo khozyaistva, 2002, 480 p.
- Petrov A.P., Burdin N.A., Kozhukhov N.I., *Lesnoi kompleks (Voprosy teorii i praktiki)* (Timber complex (Questions of theory and practice)), Moscow: Lesn. prom-st', 1986, 296 p.
- Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I., *Klimat i gornye lesa Yuzhnoi Sibiri* (Climate and montane forests of South Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1986, 224 p.
- Rebrova O.Y., *Statisticheskii analiz meditsinskikh dannykh. Primenenie paketa prikladnykh programm STATISTICA* (Statistical analysis of medical data. Using the STATISTICA Application Package), Moscow: Media Sfera, 2003, 305 p.
- Sedel'nikov V.P., Lapshina E.I., Korolyuk A.Y., Valutskii V.I., Ermakov N.B., Ershova E.A., Makunina N.I., Mal'tseva T.V., *Srednemasshtabnoe kartirovanie rastitel'nosti gor Yuzhnoi Sibiri* (Middle-scale mapping of vegetation in the mountains of South Siberia), *Sibirskii Ekologicheskii zhurnal*, 2005, Vol. 12, No. 6, pp. 939–953.