

УДК 630\*181(182.5)

## ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ ПО МАТЕРИАЛАМ ЛЕСОУСТРОЙСТВА (НА ПРИМЕРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «АЗАС»)

С. К. Фарбер, Н. С. Кузьмик

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

E-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, kuzmik@ksc.krasn.ru

*Поступила в редакцию 15.07.2019 г.*

На примере Государственного природного заповедника «Азас» определяется потенциальная продуктивность древостоев в зависимости от лесорастительных условий. Формируются множественные уравнения регрессии. В качестве зависимой переменной используется класс бонитета. Исходная для составления уравнений информация – материалы лесоустройства и данные цифровой модели рельефа. Почва, влага и тепло – основные факторы, влияющие на развитие насаждений. Теплообеспеченность местоположений рассматривается как производное от показателей рельефа. Показатели влажности и плодородия местоположений конструируются на основе характеристик таксационных выделов. Лиственничники и кедровники встречаются на протяжении всего высотного профиля: диапазон перепадов абсолютных высот у лиственничников около 1600 м, у кедровников – 2200, у сосняков – 700, у ельников – 500 м. Вертикальный градиент температуры значимо отражается на представленности пород деревьев, но не влияет на продуктивность древостоев. Достоверное снижение класса бонитета по мере набора высоты наблюдается только у лиственничных древостоев. Влияние экспозиции и величины уклона на продуктивность древостоев не прослеживается. Ранжированный ряд влажности местоположений демонстрируется относительно обобщенного качественного показателя лесорастительных условий – типа леса. Выявлено, что класс бонитета сосняков определяется, главным образом, влажностью местоположений; у лиственничных древостоев наблюдается зависимость класса бонитета от абсолютной высоты местности, влажности и плодородия местоположений; продуктивность древостоев кедра и ели закономерно зависит от влажности и плодородия местоположений. Картографирование потенциальной продуктивности древостоев произведено по значениям абсолютных высот, влажности и плодородия лесотаксационных выделов. Визуальный анализ карты показывает, что на лучших по режиму увлажнения и плодородию почвах, расположенных на прогреваемых участках, могут произрастать более производительные древостои. Наиболее благоприятные лесорастительные условия сложились на террасах р. Азас, на лугах и лесостепных участках, но по мере увеличения высотных отметок лесорастительные условия ухудшаются.

**Ключевые слова:** лесорастительные условия, типы леса, классы бонитета, влажность и плодородие, рельеф местности.

DOI: 10.15372/SJFS20200302

### ВВЕДЕНИЕ

Тип леса характеризует лесорастительные условия (комплекс климатических, орографических, гидрологических и почвенных факторов) на качественном уровне (Сукачев, 1972). Для количественной оценки продуктивности древостоя используются классы бонитета, за-

висящие от лесорастительных условий (Лесное хозяйство..., 2002). Совместное рассмотрение типа леса и класса бонитета считается взаимодополняющей качественной и количественной оценкой продуктивности древостоев и лесорастительных условий. Известны различные варианты формирования шкал классов бонитета (Орлов, 1929; Strand, 1952; Семечкин, 2002 и др.).

С. J. Cieszewski et al. (1998) обобщили подходы к их формированию. В практике лесного хозяйства используются шкалы классов бонитета отдельно для семенных и порослевых насаждений М. М. Орлова (Анучин, 1982). При этом сопоставить разные шкалы по значениям класса бонитета невозможно (Кузьмичев, 2013).

Класс бонитета – не единственный показатель, позволяющий оценивать продуктивность лесорастительных условий. Поиск новых подходов обобщенного описания насаждений продолжается. Изучается связь таксационных показателей древостоев с условиями местопрорастания (Филиппов и др., 1980), предлагается использование ландшафтного подхода (Киреев, Рубцов, 1976; Калашников, Киреев, 1978; Зиганшин, 2000, 2014; Ecology..., 2006; Patterns..., 2008). Разрабатываются классификации по факторам продуктивности (Жилкин, 1965; Тихонов, 1986); изучаются зависимости между классами бонитета, типами леса, ландшафтами и таксационными показателями насаждений (Rennie, 1963; Stage, 1976; Швиденко и др., 2001, 2004, 2008; Lefsky et al., 2005; Shvidenko et al., 2007; Schepaschenko et al., 2011; Данилин, Фаворская, 2013; Фарбер и др., 2017; Фарбер, Максютков, 2018). В. В. Загребев (1978) без явно выраженного предпочтения рассматривает различные критерии количественного учета условий произрастания.

Современные методы обработки данных и картографирования предоставляют дополнительные возможности анализа. В полной мере это относится и к данным лесоустройства, в частности применительно к оценке лесорастительных условий. Цель работы – определение и картографирование потенциальной продуктивности (классов бонитета) древостоев, в том числе на не покрытых лесом землях.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Продуктивность древостоев* определяется посредством многофакторного регрессионного анализа. В качестве зависимой переменной принимается *класс бонитета*. Для выполнения статистической обработки значения классов бонитета кодируются в форме ряда целых чисел (Va и Vб классы принимают значения 6 и 7 соответственно). В качестве аргументов рассматриваются *показатели лесорастительных условий*. Почва, влага и тепло – основные факторы, влияющие на рост и состояние насаждений. Оценке подлежат показатели, которые можно получить

посредством анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) (*абсолютная высота местности, экспозиция и уклон поверхности*) и посредством комплексного анализа описаний лесотаксационных выделов (*влажность и плодородие местоположений*). Уровень значимости уравнений принят равным 0.95. Расчет продуктивности древостоев производится для каждого таксационного выдела с внесением результатов в соответствующее поле атрибутивной таблицы ГИС, что определяет возможность последующего картографирования.

**Анализ ЦМР.** Рассматриваются основные показатели рельефа – абсолютная высота, экспозиция, уклон. Анализ проводился средствами ГИС (ArcGIS, модуль Spatial Analyst). Для определения показателей рельефа использована ЦМР в виде данных матрицы SRTM (Karwel, Ewiak, 2008). Погрешности ЦМР, возникающие за счет наличия растительного покрова, не учитываются.

Приняты следующие градации показателей рельефа:

- *H* (абсолютная высота) – интервал 200 м;
- *Asp* (экспозиция) – интервал 45°;
- *Sl* (уклон) – интервал 2°.

Градациям показателей рельефа присвоены индексы в виде порядковых чисел. Далее показатели рельефа могут использоваться непосредственно для картографирования, а также для выявления связей с таксационными показателями выделов с последующим составлением уравнений регрессии. При формировании зависимостей необходимо 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 северных и южных экспозиций, румбам, симметричным относительно направления север – юг, присваивался одноименный индекс экспозиции. Плоские местоположения занимают промежуточное положение.

**Оценка продуктивности древостоев по показателям рельефа.** Состояние растительного покрова находится в зависимости от годовой суммы активных температур (Поликарпов и др., 1986; Седелников и др., 2005). Распределение тепла по поверхности неравномерно и связано с показателями рельефа. Перераспределение теп-

ла, поступающего к поверхности Земли, 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 – понижает количество тепла;
- по регионам изменение температуры в зависимости как от высоты местности, так и от величины уклонов непрерывно и прямолинейно.

Отсюда следует, что при выявлении сопряженности характеристик лесного покрова с лесорастительными условиями количество тепла можно заменить показателями рельефа местности (Фарбер и др., 2017). 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 характеристики рельефа.

**Оценка продуктивности древостоев по индексу влажности.** Степень увлажнения местоположений определяется в экспертном порядке. По описанию лесотаксационных выделов производится их сопоставление с получением ранжированного по влажности ряда типов леса. Оценка комплексная, принимаются во внимание таксационное описание насаждений и информация из макета дополнительных сведений. По отношению к типам леса принимается последовательное увеличение порядкового номера в ряду от сухих к более увлажненным местоположениям (Фарбер и др., 2017). Общий вид зависимости  $B_w = f(W)$ , где  $W$  – порядковый номер в ранжированном ряду влажности почв,  $B_w$  – класс бонитета, зависящий от влажности почв.

Оценка влажности почв производится для всех лесотаксационных выделов. Для выделов погибших насаждений влажность определяется в сравнении с насаждениями, занимающими аналогичные местоположения (Фарбер, 1997). Далее индекс влажности используется в качестве независимой переменной в уравнениях продуктивности древесных пород. Расчетные значения  $B_w$  вносятся в отдельные поля атрибутивной таблицы таксационных выделов.

**Оценка продуктивности древостоев по индексу плодородия.** Содержание питательных веществ, кислотность, степень влажности от-

личаются по видам почв. По отношению к древесным породам обобщенной характеристикой почв может рассматриваться их плодородие. Таксационные показатели насаждений зависят от лесорастительных условий, в том числе от плодородия почв. Можно допустить, что верно и обратное: плодородие может оцениваться на основе лесотаксационных показателей насаждений. Можно записать  $B_s = f(S)$ , где  $B_s$  – класс бонитета древостоя, зависящий от плодородия почв;  $S$  – показатель плодородия почв. Для получения зависимости  $B_s = f(S)$  необходимо определиться с индексом плодородия.

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 конкретному значению высоты  $h_0$  (Фарбер, 1997, 2000). Использование в качестве индекса почвенного плодородия отношения высот  $h/h_0$  предпочтительнее по той причине, что высота варьирует меньше, чем диаметр. Для определения  $h_0$  может использоваться уравнение регрессии  $h_0 = f(A)$ , где  $A$  – возраст древостоя, лет. Посредством введения дополнительного аргумента точность оценок  $h_0$  повышается. По признаку наименьшего варьирования в качестве дополнительного аргумента используется диаметр  $h_0 = f(d, A)$ . Последовательность оценки продуктивности древостоев по индексу плодородия почв:

- получение уравнений регрессии  $h_0 = f(d, A)$ ;
- вычисление значений индекса плодородия почв  $S = h/h_0$  с внесением в атрибутивную таблицу;
- вычисление для древесной породы и типа почвы средних значений индекса плодородия почв  $S_i = \sum S/n$ ;
- вычисление общего для всех пород деревьев и типов почвы средневзвешенного значения индекса плодородия почв  $S_0 = \sum (S_i \cdot n_i) / N$ , где  $N = \sum n_i$ ;
- получение для древесных пород уравнений регрессии  $B_s = f(S_0)$ .

**Оценка продуктивности древостоев по показателям рельефа, индексам влажности и плодородия.** Формируются многофакторные уравнения регрессии. В качестве предикторов можно использовать значения  $B_r, B_w, B_s$  таксационных выделов. Тогда общий вид зависимости  $B_0 = f(B_r, B_w, B_s)$ , где  $B_0$  – класс бонитета, зависящий от тепла, влажности и плодородия местоположений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Государственный природный заповедник «Азас» расположен в Республике Тыва в Тоджинской котловине на площади 333 884 га. Наиболее существенным фактором в формировании современного рельефа были неоген-четвертичные тектонические движения, сопровождавшиеся вулканической деятельностью с излиянием базальтов. Тектонический рельеф в значительной степени преобразован 3-кратным четвертичным оледенением, что в сочетании с эрозийными процессами создало сложный комплекс ледниково-аккумулятивных и экзарационных форм (Гросвальд, 1965). Абсолютный перепад высот на территории заповедника – от 944 м на западе до 2600 м на востоке. Климат Тоджинской котловины определяется географическим положением Тывы в центре Азии. Невысокое горное обрамление котловины не препятствует северо-западным ветрам, несущим влажный атлантический воздух. Дополнительное увлажнение создают местные осадки за счет обильных испарений с озер и болот (Ефимцев, 1957). В геологическом строении территории участвуют протерозойские и палеозойские породы: песчаники, конгломераты, известняки, кристаллические сланцы, гнейсы, порфириды, интрузии гранитов и гранодиоритов (Додин, 1961). На востоке древние коренные породы перекрыты мощной толщей базальтов и туфов (Гросвальд, 1965). Большая часть территории заповедника покрыта чехлом моренных и флювиогляциальных четвертичных отложений. Почвообразующей породой служат элювий, элювиоделювий коренных пород суглинисто-дресвяно-щебнистого состава. В средне- и низкогорье преобладают моренные и флювиогляциальные четвертичные отложения: супесчано-гравийно-галечниковые (щебнистые) бурого цвета. Значительно реже почвы формируются на аллювиальных, пролювиально-аллювиальных и озерных отложениях: суглинках, галечниках, песках, супесях, торфяных осадках (Молокова, Седых, 2012).

По лесорастительному районированию территория заповедника входит в Тоджинский округ подтаежных сосново-лиственничных и горно-таежных лиственничных, сосновых и кедровых лесов (Типы..., 1980). В низкогорье фрагментарно выражен степной пояс, лесостепь в ландшафтном ее понимании в заповеднике отсутствует. Степные экосистемы контактируют с подтаежными или таежными, поднимаясь по южным склонам до высоты 1300 м. В лесном

поясе прослеживается смена с высотой подтаежных травяных лиственничных и березовых лесов (900–1100 м) на горно-таежные лиственничные, кедровые, преимущественно моховые леса (1000–1700 м) и затем подгольцовые кедровые, кедрово-лиственничные леса и редколесья (1700–1900 м) с доминированием ерниково-зеленомошной и ерниково-лишайниковой групп типов леса. Высокогорный пояс (1900–2600 м) по характеру ландшафта горно-тундровый с включением субальпийской и альпийской растительности. К особенностям растительного покрова, обусловленным ледниковыми формами рельефа в сочетании с мерзлотными процессами, относится широкое распространение сфагновых болот и заболоченных редколесий, кустарниковой растительности на флювиогляциальных речных террасах, сосновых разнотравно-брусничных лесов на моренных отложениях. Характерный элемент для всех высотных поясов – скалы, щебнистые и курумные россыпи с пионерными группировками растений.

**Исходные материалы.** Лесоустройство в заповеднике проводилось в 2015 г. по III разряду дешифровочным методом при нормативном количестве наземных глазомерно-измерительных описаний. Количество таксационных выделов в заповеднике 11 739. Из них сосновых – 56, лиственничных – 2424, кедровых – 5931, еловых – 237. Анализ выполнен с привлечением всех таксационных выделов заповедника. Кроме данных массовой таксации и ЦМР в работе использовались нормативно-справочные материалы лесоустройства – схемы типов леса и нелесных сообществ, планово-картографические и фондовые материалы заповедника.

**Зависимость продуктивности древостоев от показателей рельефа.** В результате проведения пространственного анализа рельефа каждый таксационный выдел отнесен к определенной группе абсолютных высот, экспозиций и уклонов. Выполнен корреляционный анализ характеристик рельефа с классами бонитета. Теснота связи оценивается посредством коэффициента корреляции Пирсона  $R$ . При  $R \leq 0.25$  корреляция слабая, при  $0.25 \leq R \leq 0.75$  – умеренная, а при  $R > 0.75$  – сильная (Реброва, 2003).

Рельеф заповедника горный. Однако вопреки ожиданиям корреляция классов бонитета древостоев с показателями рельефа в основном отсутствует (табл. 1).

Умеренная положительная корреляция с абсолютной высотой наблюдается только у лиственничных древостоев. По отношению к на-

**Таблица 1.** Коэффициенты парной корреляции классов бонитета древостоев  $R_H$ ,  $R_{Asp}$ ,  $R_{Sl}$  с абсолютной высотой, экспозицией и уклоном

Древостой	Коэффициенты парной корреляции		
	$R_H$	$R_{Asp}$	$R_{Sl}$
Сосняк	0.078	0.077	0.023
Лиственничник	0.402	-0.064	-0.119
Кедровник	0.089	0.052	0.041
Ельник	0.165	0.007	0.014

саждениям с другими преобладающими породами можно констатировать только слабую корреляцию или тенденцию снижения класса бонитета по мере увеличения высотной отметки местности.

По результатам оценки распределения насаждений по абсолютным высотам установлено, что лиственничники и кедровники в заповеднике встречаются на значительном протяжении высотного спектра: диапазон перепада абсолютных высот у лиственничников около 1600 м, у кедровников – 2200 м. Сосняки и ельники произрастают в более узком диапазоне перепадов высот: сосняки – около 700 м, ельники – около 500 м. Получается, что вертикальный градиент температуры значимо отражается на представленности пород деревьев в высотных поясах заповедника, но не влияет на продуктивность древостоев. Достоверное снижение класса бонитета по мере набора высоты наблюдается только у лиственничных древостоев. Влияние экспозиции и уклонов на продуктивность древостоев не прослеживается.

Влияние рельефа на продуктивность лиственничных древостоев описывается уравнением

$$B_r = 3.774 + 0.027H^2 - 0.290H \quad (R^2 = 0.170).$$

Линейная зависимость классов бонитета древостоев сосняков, кедровников и ельников от показателей рельефа отсутствует.

**Зависимость продуктивности древостоев от индекса влажности.** Влажность почв влияет на продуктивность древостоев и является фактором, лимитирующим произрастание древесных пород. Информация для анализа – тип леса, преобладающая порода, класс бонитета, почва (название, механический состав, степень влажности). В упрощенном виде ранжированный ряд влажности почв демонстрируется относительно обобщенного качественного показателя лесорастительных условий – типа леса. Типологическая таблица разработана Н. И. Мо-

ловой (1992) в заповеднике и адаптирована для проведения лесоустройства (табл. 2).

Связь продуктивности древостоев с индексом влажности описывается уравнениями

$$B_w = 4.622 - 0.311W \quad (R^2 = 0.081) \text{ – сосняки;}$$

$$B_w = 4.064 + 0.079W^2 - 0.568W \quad (R^2 = 0.418) \text{ – лиственничники;}$$

$$B_w = 5.706 + 0.050W - 0.460W^2 \quad (R^2 = 0.270) \text{ – кедровники;}$$

$$B_w = 3.528 + 0.030W^2 \quad (R^2 = 0.480) \text{ – ельники.}$$

Теснота связи влажности почв с продуктивностью лиственничных, кедровых и еловых древостоев умеренная, с продуктивностью сосновых – слабая. Отсюда следует, что влажность почв подлежит учету в качестве аргумента общей модели потенциальной продуктивности древостоев. Насаждения заповедника произрастают при определенной влажности.

Сосняки занимают местоположения с баллами влажности 2 и 3, лиственничники – от 1 до 9, кедровники – от 1 до 9, ельники – от 3 до 9. Еще более влажные местоположения занимают заболоченные кустарники.

Получается, что влажность почв лимитирует местоположение пород деревьев, и этот факт далее используется при картографировании потенциальной продуктивности древесных пород. Так, местоположения с индексом влажности 1 в качестве потенциально возможных для произрастания ели выпадают.

**Зависимость продуктивности древостоев от индекса плодородия почв.** Получены следующие уравнения:

$$h_0 = 0.132 + 1.084d - 0.010d^2 - 0.013A \quad (R^2 = 0.856) \text{ – сосняки;}$$

$$h_0 = 2.053 + 1.373d - 0.014d^2 - 0.104A \quad (R^2 = 0.789) \text{ – лиственничники;}$$

$$h_0 = 0.049 + 0.809d - 0.008d^2 + 0.014A \quad (R^2 = 0.705) \text{ – кедровники;}$$

$$h_0 = -2.791 + 1.130d - 0.011d^2 + 0.012A \quad (R^2 = 0.858) \text{ – ельники.}$$

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 наи-

**Таблица 2.** Распределение типов леса по значениям индекса влажности

Древостой	Индекс влажности, балл								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сосняк	–	осрт	брбд, брзм, ртбр	–	–	–	–	–	–
Лиственничник	лшбд, лгел, кшлш	спрт	брзм, ртбр, брбд, бррд	кртв, крпо, оскр, осрт, змд	взм, змбд, рдзм, осзм, глбр	бглш, чзм, ечзм, змбг, ерлш, елзм, кдзм	бгмх, гلمх, ермх	еозм	бгсф, ебсф, еосф, трбл
Кедровник	лшбд, кшлш	спрт, стлг	брзм, ртбр, бррд, рит, брбд	осрт, змд, змкр, олпа	взм, змбд, рдзм, осзм, глбр, ртсб	бглш, чзм, ечзм, змбг, кдзм, ерлш, ерзм	бгмх, гلمх, ермх, пойм	еозм, кшзм	бгсф, ебсф, еосф, трбл, тмер, кшсф
Ельник	–	–	ртбр, брзм	змд, змкр, крпо, осрт	осзм, взм, глбр	змбг	бгмх, гلمх, ермх, пойм	еозм	бгсф, ебсф, еосф
Березняк	–	спрт	ртбр, бррд	кртв, оскр, осрт, змд	взм, осзм	змбг	бгмх, гلمх, пойм	–	бгсф, ебсф, трбл
Осинник	–	спрт	–	змд, кртв, осрт	–	–	–	–	–

*Примечание.* Типы леса: бглш – багульниково-лишайниковый; бгмх – багульниково-моховой; бгсф – багульниково-сфагновый; брбд – бруснично-бадановый; брзм – бруснично-зеленомошный; бррд – бруснично-рододендроновый; взм – веяниково-зеленомошный; глбр – голубично-багульниково-брусничный; глмх – голубично-моховой; ебсф – ерниково-багульниково-сфагновый; елзм – ерниково-лишайниково-зеленомошный; еозм – ерниковый осоково-зеленомошный; еосф – ерниковый осоково-сфагновый; ерлш – ерниково-лишайниковый; ермх – ерниково-моховой; ечзм – ерниковый чернично-лишайниково-зеленомошный; змбг – зеленомошно-багульниковый; змбд – зеленомошно-бадановый; змкр – зеленомошно-крупнотравный; змд – зеленомошный долинный; кдзм – кустарничково-долгомошно-зеленомошный; крпо – крупнотравный пойменный; кртв – крупнотравно-вейниковый; кшзм – кашкарниково-зеленомошный; кшлш – кашкарниково-лишайниковый; кшсф – кашкарниково-сфагновый; лшбд – лишайниково-бадановый; лгел – луг суходольный лесной (елань); осрт – осочково-разнотравный; оскр – осочково-крупнотравный; олпа – ольховниково-папоротниковый; осзм – осоково-зеленомошный; пойм – пойменный; рдзм – рододендрово-зеленомошный; рит – бруснично-ритидиевый; ртсб – разнотравный субальпийский; ртбр – разнотравно-брусничный; спрт – спирейно-разнотравный; стлг – степь кустарничково-луговая; трбл – травяно-болотный; тмер – тундра мохово-ерниковая; ерзм – ерниково-зеленомошный; чзм – чернично-зеленомошный.

менованию почвы для  $i$ -й древесной породы. Соответственно оценка плодородия почв (и картирование) на основе  $S_i$  возможна для таксационных выделов  $i$ -й древесной породы. Показатель  $S_0$  относится ко всем древесным породам.

Оценка плодородия почв (и картирование) на основе  $S_0$  становится возможной на основании наименования почвы для всех таксационных выделов, включая выделы лиственных древостоев (березняки и осинники), погибших насаждений и луга. Большему значению  $S_0$  соответствуют более плодородные почвы.

Аналитический вид уравнений  $B_s = f(S_0)$  получен по данным классов бонитета древостоев и индексу почвенного плодородия  $S_0$  таксационных выделов (у сосняков связи нет):

$$B_s = -78.580 - 105.141 S_0^2 + 187.558 S_0$$

$(R^2 = 0.443)$  – лиственничники;

$$B_s = 4.822 - 8.220 S_0^2 + 8.375 S_0$$

$(R^2 = 0.226)$  – кедровники;

$$B_s = 14.159 - 9.624 S_0^2$$

$(R^2 = 0.335)$  – ельники.

Таблица 3. Распределение индексов плодородия почв по наименованиям почв

Почвы	Древесная порода												$S_0$
	Сосна обыкновенная			Лиственница сибирская			Сосна сибирская кедровая (кедр сибирский)			Ель сибирская			
	$n$	$B_{cp}$	$S_i$	$n$	$B_{cp}$	$S_i$	$n$	$B_{cp}$	$S_i$	$n$	$B_{cp}$	$S_i$	
Буротаяжные	–	–	–	16	4.00	1.03	32	4.81	1.00	3	4.00	0.99	1.01
Высокогорные дерново-гольцовые	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Горно-луговые дерново-торфянистые	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Горно-луговые дерновые	–	–	–	–	–	–	11	5.91	0.79	–	–	–	0.79
Горные примитивные	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Дерново-подзолистые	–	–	–	69	3.39	1.02	24	4.50	1.09	129	3.95	1.01	1.02
Дерново-подзолистые мелкоподзолистые	–	–	–	–	–	–	2	4.00	1.03	–	–	–	1.03
Дерново-таежные кислые неоподзоленные	27	3.74	1.00	352	3.18	1.02	295	4.74	1.01	4	4.00	1.00	1.01
Дерново-таежные кислые слабоподзоленные	17	3.59	1.01	371	3.39	1.02	1207	4.70	1.03	11	4.27	1.04	1.03
Иловато-песчаные примитивные	–	–	–	–	–	–	1	5.00	1.00	1	6.00	0.72	0.86
Лугово-черноземные выщелоченные	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Луговые (без разделения)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Подбурья темные таежные	–	–	–	7	5.43	0.92	90	5.28	0.92	–	–	–	0.92
Подбурья темные таежные (перегнойно-оподзоленные)	–	–	–	91	3.32	0.97	94	4.54	1.02	11	4.00	1.01	1.00
Подбурья темные таежные (перегнойные)	–	–	–	–	–	–	2	4.00	1.11	–	–	–	1.11
Подбурья темные таежные (торфянисто-перегнойные)	–	–	–	150	3.89	0.99	708	4.94	1.04	22	4.36	0.99	1.03
Подбурья темные таежные (торфянистые)	–	–	–	334	4.05	0.99	1349	4.96	1.01	23	5.26	0.97	1.00
Подбурья темные тундровые	–	–	–	41	4.73	0.88	125	5.62	0.88	–	–	–	0.88
Подзолы иллювиально-гумусовые	–	–	–	44	4.09	0.97	224	5.15	0.95	–	–	–	0.95
Пойменные кислые дерновые	–	–	–	11	3.00	0.96	134	4.43	1.05	12	4.00	1.03	1.04
Пойменные луговые	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Серые лесные	–	–	–	70	2.60	1.06	6	4.50	1.10	–	–	–	1.06
Таежные глеевые торфянисто-перегнойные	–	–	–	158	4.32	0.94	525	4.99	0.98	4	4.50	1.00	0.97
Темно-серые лесные	11	4.00	0.98	489	2.36	1.04	6	4.83	1.01	1	4.00	1.07	1.04
Торфянисто-глеевые болотные	–	–	–	3	5.00	1.00	1	6.00	0.84	–	–	–	0.96
Торфяные болотные переходные	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Торфяные болотные верховые	–	–	–	190	5.14	0.93	929	5.67	0.94	16	5.88	0.89	0.94
Тундровые глеевые торфянисто-перегнойные	–	–	–	–	–	–	4	7.00	0.67	–	–	–	0.67
Тундровые глеевые торфянистые и торфяные	–	–	–	11	5.09	0.99	68	5.37	1.00	–	–	–	1.00
Чернозем обыкновенный	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание.  $n$  – количество наблюдений (таксационных выделов);  $B_{cp}$  – средний класс бонитета;  $S_i$  – среднее значение отношения  $h/h_0$  для древесной породы;  $S_0$  – общее для древесных пород средневзвешенное значение отношения  $h/h_0$ .

Плодородие почв возрастает от сухих к дренированным и от переувлажненных заболоченных к дренированным. Более производительные древостои произрастают на дренированных почвах, влажность которых оптимальна. При натурной таксации описание почв более точное, поскольку зачастую предоставляется возможность непосредственного наблюдения обнажившихся по ряду причин почвенных горизонтов. При дешифровочной таксации описание почв основано исключительно на косвенных признаках. Однако, несмотря на очевидную субъективность оценок, наблюдается статистически значимая связь таксационных показателей древостоев с типами почв. Можно предположить, что реальная взаимосвязь плодородия почв и древесных пород еще более высокая.

**Общая зависимость продуктивности древостоев от показателей рельефа, индексов влажности и плодородия.** Аналитический вид множественных уравнений регрессии  $B_0 = f(H, W, S_0)$ :

$$B_0 = 4.622 - 0.311 W (R^2 = 0.081) - \text{сосняки};$$

$$B_0 = -63.303 - 78.929 S_0^2 + 0.052 W^2 - 0.002 H - 0.419 W + 146.032 S_0 + 0.006 H^2 (R^2 = 0.520) - \text{лиственничники};$$

$$B_0 = 20.389 + 12.385 S_0^2 + 0.033 W^2 - 0.286 W - 27.432 S_0 (R^2 = 0.296) - \text{кедровники};$$

$$B_0 = 3.528 + 0.030 W^2 (R^2 = 0.480) - \text{ельники}.$$

Таким образом, класс бонитета сосняков зависит в основном от степени влажности почв; значимость почвенного плодородия и показателей рельефа для горно-таежных сосняков не существенна. Сравнительно невысокое значение  $R^2 = 0.081$  объясняется тем, что уравнение регрессии для сосняков включает только один аргумент – влажность и что сосняки тестового участка занимают местоположения только с индексами влажности 2 и 3. Для лиственничных древостоев наблюдается увеличение показателя  $B_0$  по мере снижения абсолютной высоты местности. Выявлена связь продуктивности лиственницы с плодородием и влажностью почв. Наблюдается зависимость продуктивности кедра и ели от плодородия и влажности почв.

Картографирование потенциальной продуктивности древостоев  $B_0$  произведено по значениям полей атрибутивной таблицы ГИС. На лучших по режиму увлажнения и плодородию почвах, расположенных на прогреваемых участ-

ках, потенциально могут произрастать более производительные древостои. Расчеты по уравнениям регрессии показывают, что в пределах заповедника наиболее благоприятные лесорастительные условия сложились на террасах р. Азас, на лугах и лесостепных участках. По мере увеличения высотных отметок лесорастительные условия ухудшаются, наблюдается синхронное изменение потенциальной продуктивности всех пород деревьев, соответствующее изменению лесорастительных условий (см. рисунок и табл. 4).

Точность оценки лесорастительных условий напрямую зависит от исходных данных. Нами использованы данные массовой таксации, которые содержат погрешности в оценках высот и возрастов элементов леса, а сам таксационный выдел не имеет строгой привязки к экспозиции и уклонам местности. Особо важное значение приобретает тип леса, который уверенно определяется при проведении натурной таксации.

При дешифровочной таксации тип леса определяется по косвенным признакам, т. е. оценка связана с определенными трудностями (Дмитриев и др., 1976) и сопровождается ошибками.

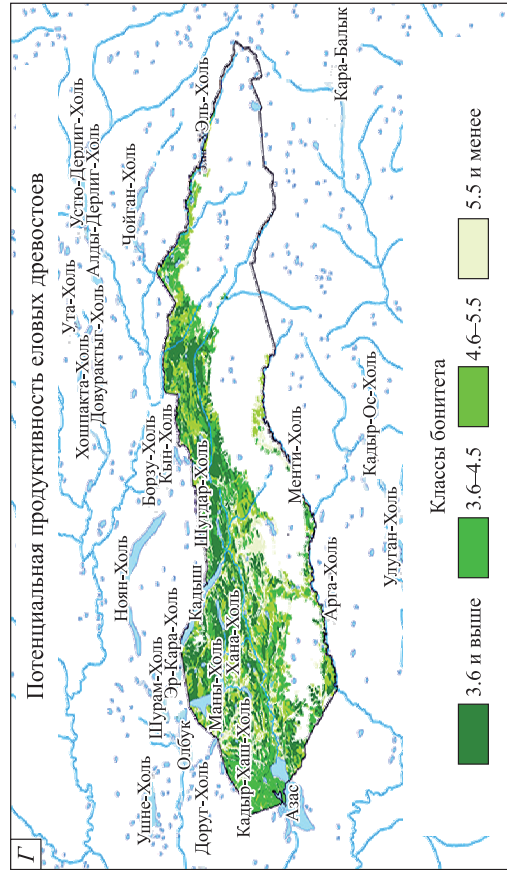
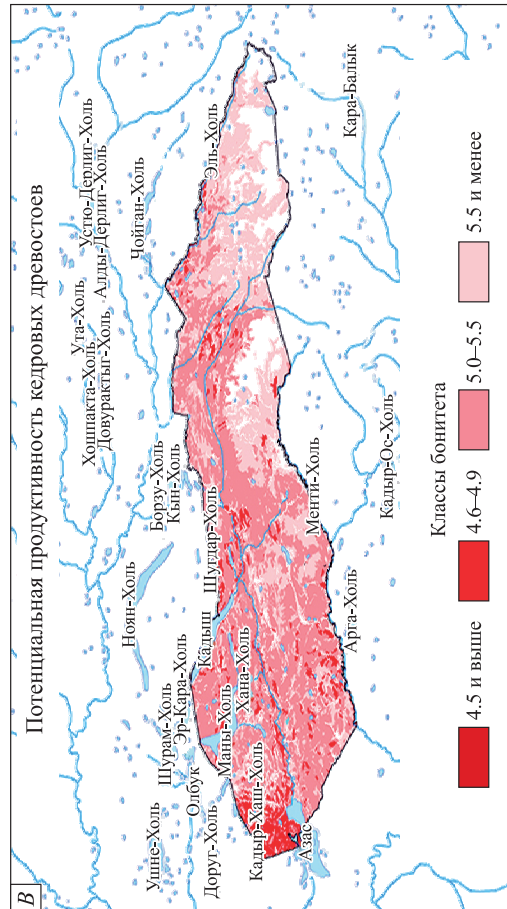
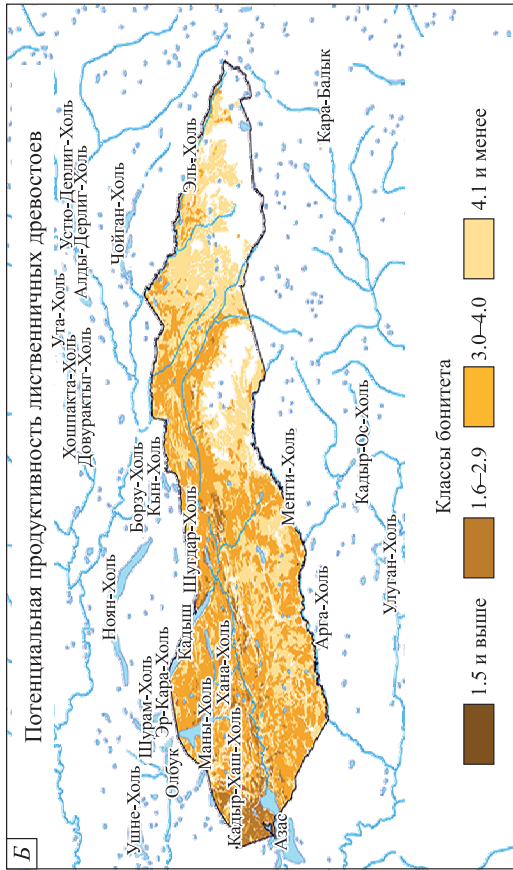
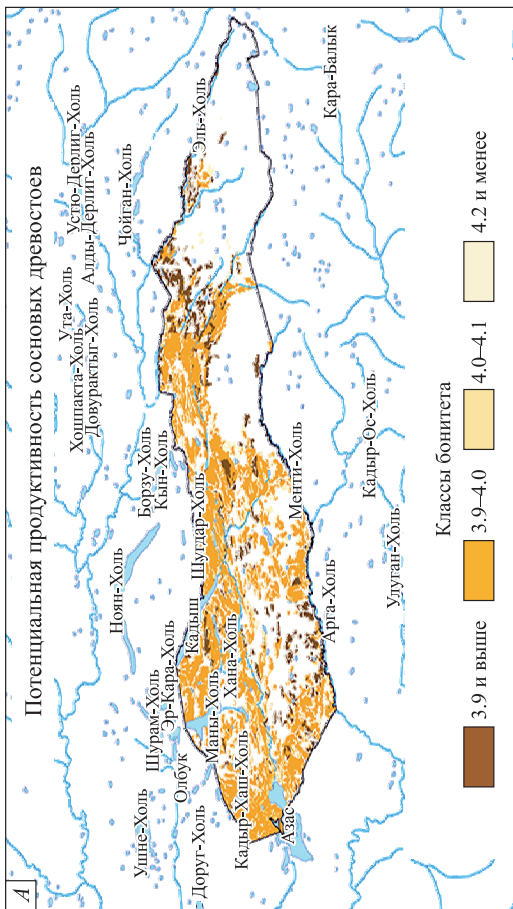
Следует также отметить, что почвы на территории заповедника изучены, по нашему мнению, недостаточно подробно, поэтому исследования должны быть продолжены.

В литературе 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. Характеристики таксационных выделов, почвенно-грунтовых условий по мере уточнения можно будет изменять в атрибутивной таблице с последующим пересчетом аналитического вида уравнений регрессии. Существует также возможность введения дополнительных предикторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что оценка потенциальной продуктивности древостоев может производиться на основе количественных взаимосвязей с факторами среды. В уравнениях регрессии в качестве зависимой переменной приняты классы бонитета преобладающих пород древостоя. В качестве независимых переменных использованы основные составляющие лесорастительных условий – показатели рельефа, индексы влажности и почвенного плодородия. Количество





Потенциальная продуктивность древостоев: А – сосновых; Б – лиственных; В – кедровых; Г – еловых.

**Таблица 4.** Данные атрибутивной таблицы таксационных выделов (фрагмент)

Показатели таксационного выдела					Лесорастительные условия, индекс			Потенциальная продуктивность древостоев $B_0$ , класс бонитета			
Тип леса	$A$ , лет	$h$ , м	$d$ , см	Класс бонитета	$H$	$W$	$S_0$	Сосна	Лиственница	Кедр	Ель
Лбрзм	170	20	28	4	9	3	1.03	4.06	3.03	4.71	3.79
Кбрзм	180	19	28	4	10	3	1.03	4.06	3.14	4.71	3.79
Кбрзм	180	20	30	4	10	3	1.03	4.06	3.14	4.71	3.79
Лбрзм	170	23	30	3	10	3	1.03	4.06	3.14	4.71	3.79
Лртбр	180	22	30	4	10	3	1.01	4.06	3.44	4.76	3.79
Лртбр	170	23	30	3	10	3	1.01	4.06	3.44	4.76	3.79
Кртбр	10	1	–	4	10	3	1.01	4.06	3.44	4.76	3.79
Лбрзм	170	22	28	4	10	3	1.03	4.06	3.14	4.71	3.79
Кглмх	180	17	30	5	10	7	0.97	–	4.25	5.05	4.98
Кермх	190	20	36	4	10	7	0.97	–	4.25	5.05	4.98
Лермх	180	21	28	4	10	7	0.97	–	4.25	5.05	4.98
Кбрзм	200	20	32	4	10	3	1.03	4.06	3.14	4.71	3.79
Кглмх	190	16	26	5	11	7	0.97	–	4.37	5.05	4.98
БКУлгтр	10	1	–	5А	10	–	–	–	–	–	–
Лглмх	180	22	28	4	11	7	0.97	–	4.37	5.05	4.98
Лермх	160	16	24	5	11	7	0.97	–	4.37	5.05	4.98
Кбрзм	200	19	32	4	11	3	1.03	4.06	3.26	4.71	3.79
БКУмхбл	10	1	–	5А	9	–	0.96	–	–	–	–
Еермх	110	16	20	5	9	7	0.97	–	4.15	5.05	4.98

*Примечание.* Лбрзм – лиственничники бруснично-зеленомошные; Кбрзм – кедровники бруснично-зеленомошные; Лртбр – лиственничники разнотравно-брусничные; Кртбр – кедровники разнотравно-брусничные; Кглмх – кедровники голубнично-моховые; Кермх – кедровники ернично-моховые; Лермх – лиственничники ернично-моховые; БКУлгтр – береза кустарниковая лугово-разнотравная; БКУмхбл – береза кустарниковая мохово-болотная; Еермх – ельники ернично-моховые.

тепла получено посредством пространственного анализа ЦМР. Влажность почв определялась в экспертном порядке в виде индексов ранжированного ряда типов леса. Плодородие почв оценивалось посредством отношения высот  $h/h_0$ , где  $h_0 = f(d, A)$ . Потенциальная продуктивность древостоев рассчитана по уравнениям множественной регрессии для каждого таксационного выдела. Оказалось, что продуктивность сосняков зависит от влажности почв, лиственничников – от абсолютной высоты местности, влажности и плодородия почв, кедровников – от влажности и плодородия почв. Существует возможность введения дополнительных предикторов. В работе демонстрируется карта, на которой показана расчетная потенциальная продуктивность хвойных пород деревьев заповедника «Азас».

Каждая древесная порода занимает свою экологическую нишу, определяемую в том числе факторами внешней среды. Из этого вовсе не следует, что увеличение, например, освещенности негативно отразится на продуктивности темнохвойных пород, а в сосняках с увеличением плодородия, напротив, снизится класс бони-

тета. Насаждения занимают местоположения в конкурентной борьбе с привлечением механизмов гомеостаза. По мнению А. Б. Когана с соавт. (1977), гомеостаз основан на обратных связях и эволюционно приближает экосистемы к оптимальному состоянию. Механизмы саморегулирования лесных экосистем формировались в процессе эволюционного развития. Ведущее значение для насаждений имеют особенности гидрологического режима почв, приуроченность к формам рельефа и абсолютная высота местности. При этом широкому диапазону лесорастительных условий отвечают древостои разных пород.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- Анучин Н. П. Лесная таксация: учеб. для вузов. 5-е изд., доп. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с. [Anuchin N. P. Lesnaya taksatsiya: ucheb. dlya vuzov. 5-e izd., dop. (Forest inventory: textbook for higher educat. inst. 5<sup>th</sup> ed. updated). Moscow: Lesn. prom-st' (Timber industry), 1982. 552 p. (in Russian)].
- Гросвальд М. Г. Развитие рельефа Саяно-Тувинского нагорья (оледенения, вулканизм, неотектоника). М.:

- Наука, 1965. 166 с. [*Grosvald M. G. Razvitie rel'efa Sayano-Tuvinskogo nagor'ya (oledneniya, vulkanizm, neotektonika) (Development of the relief of the Sayan-Tuva highlands (glaciation, volcanism, neotectonics)). Moscow: Nauka, 1965. 166 p. (in Russian).*]
- Данилин И. М., Фаворская М. Н. Трехмерное моделирование лесных ландшафтных сцен на основе данных дистанционного зондирования // География и природ. ресурсы. 2013. № 2. С. 151–159 [*Danilin I. M., Favorskaya M. N. Trekhmernoe modelirovanie lesnykh landshaftnykh stsen na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya (Three-dimensional modeling of forest landscape scenes based on remote sensing data) // Geografiya i prirod. resursy (Geogr. Nat. Res.). 2013. N. 2. P. 151–159 (in Russian with English abstract).*]
- Дмитриев И. Д., Данылис Е. П., Кропов П. А. Лесная аэро- съемка и авиация: лесотаксационное и лесохозяйственное дешифрирование аэроснимков. Пособ. для студ. лесохоз. ф-та и слушателей курсов повыш. квалификации (спец. 1512). Л.: ЛЛТА, 1976. 168 с. [*Dmitriev I. D., Danyulis E. P., Kropov P. A. Lesnaya aeros'emka i aviatsiya: lesotaksatsionnoye i lesokhozyaystvennoye deshifirovanie aerosnimkov. Posob. dlya stud. lesokhoz. f-ta i slushateley kursov povysh. kvalifikatsii (spets. 1512) (Forest aerial photography and aviation: forest inventory and forestry interpretation of aerial photographs. Manual for students of forestry fac. and students of continuing education courses (specialty 1512)). Leningrad: Leningrad For. Tech. Acad., 1976. 168 p. (in Russian).*]
- Додин А. Л. Основные черты геологического строения и металлогении восточной части Алтае-Саянской складчатой области // Природные условия Красноярского края. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 99–125 [*Dodin A. L. Osnovnye cherty geologicheskogo stroeniya i metallogenii vostochnoy chasti Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti (The main features of the geological structure and metallogeny of the Eastern part of the Altai-Sayan folded region) // Prirodnye usloviya Krasnoyarskogo kraya (Natural conditions of Krasnoyarsk Krai). Moscow: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1961. P. 99–125 (in Russian).*]
- Ефимцев Н. А. Климатический очерк / Природные условия Тувинской автономной области // Тр. Тувинской компл. экспед. Вып. 3. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 46–65 [*Efimtsev N. A. Klimaticheskiy ocherk / Prirodnye usloviya Tuvinskoy avtonomnoy oblasti (Climatic sketch / Natural conditions of the Tuva Autonomous Oblast) // Tr. Tuvinskoy kompl. Eksped. (Proc. Tuva Compl. Exped.). Iss. 3. Moscow: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1957. P. 46–65 (in Russian).*]
- Жилкин Б. Д. Классификация деревьев по продуктивности (опыт разработки и применения классификации деревьев по продуктивности в однопородных разновозрастных древостоях). М.: Лесн. пром-сть, 1965. 109 с. [*Zhilkin B. D. Klassifikatsiya derev'ev po produktivnosti (opyt razrabotki i primeneniya klassifikatsii derev'ev po produktivnosti v odnoporodnykh odnovozrastnykh drevostoyakh) (Classification of trees by productivity (an experience in the development and application of the classification of trees by productivity in uniform even-aged stands)). Moscow: Lesn. prom-st' (Timber industry), 1965. 109 p. (in Russian).*]
- Загребев В. В. Географические закономерности роста и продуктивности древостоев. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 240 с. [*Zagreev V. V. Geograficheskie zakonomernosti rosta i produktivnosti drevostoev (Geographical patterns of growth and productivity of stands). Moscow: Lesn. prom-st' (Timber industry), 1978. 240 p. (in Russian).*]
- Зиганшин Р. А. Закономерности строения древостоев Сибири и их инвентаризация на природной основе: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Красноярск: СибГТУ, 2000. 47 с. [*Ziganshin R. A. Zakonomernosti stroeniya drevostoev Sibiri i ikh inventarizatsiya na prirodnoy osnove: avtoref. dis. ... d-ra s.-kh. nauk (Regularities of the structure of tree stands of Siberia and their inventory on a natural basis: doct. agr. sci. (DSc) thesis). Krasnoyarsk: SibGTU (Sib. St. Univ. Technol.), 2000. 47 p. (in Russian).*]
- Зиганшин Р. А. Лесной массив: географические и лесотаксационные признаки и критерии // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 50–68 [*Ziganshin R. A. Lesnoy massiv: geograficheskie i lesotaksatsionnye priznaki i kriterii (Woodland: geographical and forest mensuration indicators and criteria) // Sib. lesn. zhurn. (Sib. J. For. Sci.). 2014. N. 1. P. 50–68 (in Russian with English abstract).*]
- Калашиников Е. Н., Киреев Д. М. Основы ландшафтно-статистического метода лесоинвентаризации. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 144 с. [*Kalashnikov E. N., Kireev D. M. Osnovy landshaftno-statisticheskogo metoda lesoinventarizatsii (Basics of landscape-statistical method of forest inventory). Novosibirsk: Nauka. Sib. Br., 1978. 144 p. (in Russian).*]
- Киреев Д. М., Рубцов Н. И. Ландшафтный метод лесного дешифрирования аэроснимков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 318 с. [*Kireev D. M., Rubtsov N. I. Landshaftny metod lesnogo deshifirovaniya aerosnimkov (Landscape method for forest interpretation of aerial images). Novosibirsk: Nauka. Sib. Br., 1976. 318 p. (in Russian).*]
- Коган А. Б., Наумов Н. П., Режабек Б. Г., Чораян О. Г. Биологическая кибернетика: учеб. пособ. для ун-тов по спец. «Биол.». Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1977. 408 с. [*Kogan A. B., Naumov N. P., Rezhabek B. G., Chorayan O. G. Biologicheskaya kibernetika: ucheb. posob. dlya un-tov po spets. «Biol.». Izd. 2-e, pererab. i dop. M.: Vyssh. shkola, 1977. 408 p. (in Russian).*]
- Кузьмичев В. В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2013. 207 с. [*Kuz'michev V. V. Zakonomernosti dinamiki drevostoev: printsipy i modeli (Regularities of a tree stands' dynamics: principles and models). Novosibirsk: Nauka. Sib. Br., 2013. 207 p. (in Russian).*]
- Лесное хозяйство. Терминологический словарь / Под общ. ред. А. Н. Филипчука. М.: ВНИИЛМ, 2002. 480 с. [*Lesnoe khozyaystvo. Terminologicheskyy slovar' (Forestry. Dictionary of terminology / A. N. Filipchuk (Ed.)). Moscow: VNIILM (All-Rus. Res. Inst. Silvicult. Mechaniz. For.), 2002. 480 p. (in Russian).*]
- Молокова Н. И. Эколого-ценотический анализ и феноиндикация высотно-поясных комплексов типов леса (на примере гумидных районов Саян): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16; 03.00.05. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 1992.

- 23 с. [Molokova N. I. Ekologo-tsenoticheskiy analiz i fenoindikatsiya vysotno-poyasnykh kompleksov tipov lesa (na primere gumidnykh rayonov Sayan) (Ecological-coenotic analysis and phenoindication of high-altitude belt complexes of forest types (on the example of the Sayan humid areas): cand. biol. sci. (PhD) thesis). Krasnoyarsk: In-t lesa im. V. N. Sukacheva SO RAN (V. N. Sukachev Inst. For., Rus. Acad. Sci., Sib. Br.), 1992. 23 p. (in Russian)].
- Молокова Н. И., Седых В. Н. Государственный природный заповедник «Азас» // Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации. М.: Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2012. С. 288–291 [Molokova N. I., Sedykh V. N. Gosudarstvenny prirodny zapovednik «Azas» (State nature reserve «Azas») // Pochvy zapovednikov i natsionalnykh parkov Rossiyskoy Federatsii (Soils of nature reserves and national parks of the Russian Federation). Moscow: Fond «Infosfera» – NIA-Priroda, 2012. P. 288–291 (in Russian)].
- Орлов М. М. Лесная таксация. 3-е изд., пересмотр. и доп. Л.: Лесн. хоз-во и лесн. пром-сть, 1929. 532 с. [Orlov M. M. Lesnaya taksatsiya. 3-e izd., peresmotr. i dop. (Forest inventory. 3rd ed., revised and updated). Leningrad: Lesn. khoz-vo i lesn. prom-st' (Forestry and timber industry), 1929. 532 p. (in Russian)].
- Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 224 с. [Polikarpov N. P., Chebakova N. M., Nazimova D. I. Klimat i gornye lesa Yuzhnoy Sibiri (Climate and mountain forests of the Southern Siberia). Novosibirsk: Nauka. Sib. Br., 1986. 224 p. (in Russian)].
- Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: Изд-во Медиа Сфера, 2003. 305 с. [Rebrova O. Yu. Statisticheskiy analiz meditsinskikh dannykh. Primenenie paketa prikladnykh programm STATISTICA (Statistical analysis of medical data. Using the STATISTICA application package). Moscow: Izd-vo Media Sfera (Media Sphere Publ.), 2003. 305 p. (in Russian)].
- Седельников В. П., Лапина Е. И., Королюк А. Ю., Валутский В. И., Ермаков Н. Б., Еришова Э. А., Макунина Н. И., Мальцева Т. В. Среднемасштабное картирование растительности гор Южной Сибири // Сиб. экол. журн. 2005. Т. 12. № 6. С. 939–953 [Sedel'nikov V. P., Lapshina E. I., Korolyuk A. Yu., Valutskiy V. I., Ermakov N. B., Ershova E. A., Makunina N. I., Mal'tseva T. V. Srednemashtabnoe kartirovanie rastitel'nosti gor Yuzhnoy Sibiri (Medium-scale mapping of vegetation in the mountains of South Siberia) // Sib. ekol. zhurn. (Sib. J. Ecol.) 2005. V. 12. N. 6. P. 939–953 (in Russian with English abstract)].
- Семечкин И. В. Структура и динамика кедровников Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 253 с. [Semechkin I. V. Struktura i dinamika kedrovnikov Sibiri (Structure and dynamics of the Siberian stone pine forests). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN (Sib. Br., Rus. Acad. Sci. Publ.), 2002. 253 p. (in Russian with English title, summary and contents)].
- Сукачев В. Н. Избранные труды. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. Т. 1. 418 с. [Sukachev V. N. Izbrannyye trudy. Osnovy lesnoy tipologii i biogeotsenologii (Selected Works. Bases of forest typology and biogeocoenology). Leningrad: Nauka. Leningrad. Br., 1972. V. 1. 418 p. (in Russian)].
- Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 334 с. [Tipy lesov gor Yuzhnoy Sibiri (Types of forests in the mountains of South Siberia). Novosibirsk: Nauka. Sib. Br., 1980. 334 p. (in Russian)].
- Тихонов А. С. Принципы классификации лесов по факторам продуктивности // Лесоведение. 1986. № 3. С. 3–9 [Tikhonov A. S. Printsipy klassifikatsii lesov po faktoram produktivnosti (Principles of classification of forests by productivity factors) // Lesovedenie (For. Sci.). 1986. N. 3. P. 3–9 (in Russian with English abstract)].
- Фарбер С. К. Лесные измерения по среднемасштабным аэроснимкам. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 106 с. [Farber S. K. Lesnye izmereniya po srednemashtabnym aerosnimkam (Forest measurements by medium-scale aerial images). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN (Sib. Br., Rus. Acad. Sci. Publ.), 1997. 106 p. (in Russian)].
- Фарбер С. К. Формирование древостоев Восточной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 432 с. [Farber S. K. Formirovanie drevostoev Vostochnoy Sibiri (Formation of tree stands of the Eastern Siberia). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN (Sib. Br., Rus. Acad. Sci. Publ.), 2000. 432 p. (in Russian)].
- Фарбер С. К., Кошкарлова В. Л., Кузьмик Н. С. Картографирование лесных формаций голоцена с использованием основных показателей климата – тепла и влаги // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 26–40 [Farber S. K., Koshkarova V. L., Kuzmik N. S. Kartografirovaniye lesnykh formatsiy golotsena s ispol'zovaniem osnovnykh pokazateley klimata – tepla i vlagi (Mapping the Holocene forest formations with the use of key climate indicators – heat and moisture) // Sib. lesn. zhurn. (Sib. J. For. Sci.). 2017. N. 6. P. 26–40 (in Russian with English abstract)].
- Фарбер С. К., Максютов Ш. Ш. Картографирование типов лесов по приуроченности к рельефу местности // Сиб. лесн. журн. 2018. № 2. С. 38–47 [Farber S. K., Maksyutov Sh. Sh. Kartografirovaniye tipov lesov po priurochennosti k rel'efu mestnosti (Mapping of forest types confined to the lay of land) // Sib. lesn. zhurn. (Sib. J. For. Sci.). 2018. N. 2. P. 38–47 (in Russian with English abstract)].
- Филиппов Г. В., Рубцов В. Г., Чертов О. Г. Связь таксационных характеристик древостоев с условиями местопроизрастания // Лесоведение. 1980. № 1. С. 27–33 [Filippov G. V., Rubtsov V. G., Chertov O. G. Svyaz' taksatsionnykh kharakteristik drevostoev s usloviyami mestoproizrastaniya (Relationship of forest inventory characteristics of a tree stands with the conditions of growth locations) // Lesovedenie (For. Sci.). 1980. N. 1. P. 27–33 (in Russian with English abstract)].
- Флоринский И. В. Картографирование почвы на основе цифрового моделирования рельефа (по данным кинематических GPS съемок и почвенных наземных съемок) // Иссл. Земли из космоса. 2009. № 6. С. 56–65 [Florinskiy I. V. Kartografirovaniye 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)) // Issl. Zemli iz kosmosa (Earth research from space). 2009. N. 6. P. 56–65 (in Russian with English abstract)].

- Швиденко А. З., Страхов В. В., Седых В. Н., Соколов В. А., Ефремов Д. Ф. Продуктивность лесов России. III. Пространственный масштаб оценки продуктивности лесов России // Лесохоз. инф. 2001. № 1–2. С. 7–23 [Shvidenko A. Z., Strakhov V. V., Sedykh V. N., Sokolov V. A., Efremov D. F. Produktivnost' lesov Rossii. III. Prostranstvennyy masshtab otsenki produktivnosti lesov Rossii (Productivity of the Russian forests. III. The spatial scale of evaluation of productivity of the Russian forests) // Lesokhoz. inf. (For. inf.). 2001. N. 1–2. P. 7–23 (in Russian)].
- Швиденко А. З., Щенащенко Д. Г., Нильссон С., Булуй Ю. И. Система моделей роста и динамики продуктивности лесов России (таблицы и модели биопродуктивности) // Лесн. хоз-во. 2004. № 2. С. 40–44 [Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., Nilsson S., Buluy Yu. I. Sistema modeley rosta i dinamiki produktivnosti lesov Rossii (tablitsy i modeli bioproduktivnosti) (System of models of growth and dynamics of productivity of the Russian forests (tables and models of bioproductivity)) // Lesn. khoz-vo (Forestry). 2004. N. 2. P. 40–44 (in Russian)].
- Швиденко А. З., Щенащенко Д. Г., Нильссон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Изд. 2-е, доп. М.: Фед. агентство лесн. хоз-ва, 2008. 886 с. [Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., Nilsson S., Buluy Yu. I. Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdeniy osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoy Evrazii (normativno-spravochnye materialy). Izd. 2-e, dop. (Tables and models of growth and productivity of major forest forming species of the Northern Eurasia (normative reference materials). 2<sup>nd</sup>, ed., updated). Moscow: Fed. For. Agency, 2008. 886 p. (in Russian)].
- Cieszewski C. J., Bailey R. L., Borders B. E., Brister G. H., Shiver B. D. Base-age invariance and inventory projections // Integrated tools for natural resources inventories in the 21<sup>st</sup> century. Gen. Tech. Rep. NC-212. St. Paul, MN: USDA, For. Serv., North Central For. Exp. St., 1998. P. 481–493.
- Ecology of hierarchical landscapes: from theory to application / J. Chen, S. C. Saunders, K. D. Brososke, T. R. Crow (Eds.). New York: Nova Sci. Publ., Inc., 2006. 311 p.
- Karwel A. K., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland // Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. Spat. Inf. Sci. 2008. V. XXXVII. Pt. B7. P. 169–172.
- Lefsky M. A., Turner D. P., Guzy M., Cohen W. B. Combining lidar estimates of aboveground biomass and Landsat estimates of stand age for spatially extensive validation of modeled forest productivity // Rem. Sens. Environ. 2005. V. 95. N. 4. P. 549–558.
- Patterns and processes in forest landscapes. Multiple use and sustainable management / R. Laforzezza, J. Chen, G. Sansi, T. R. Crow (Eds.). Netherlands: Springer, 2008. 425 p.
- Rennie P. J. Methods of assessing site capacity // The Commonwealth For. Rev. 1963. V. 42. N. 4. P. 306–317.
- Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M. A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // J. Land Use Sci. 2011. V. 6. Iss. 4. P. 245–259.
- Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., Boulouï Yu. Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests // Ecol. Model. 2007. V. 204. Iss. 1–2. P. 163–179.
- Stage A. R. An expression for the effect of aspect, slope, and habitat type on tree growth // For. Sci. 1976. V. 22. N. 4. P. 457–460.
- Strand L. A measure of the distribution of individuals over a certain area // Medd. Norske skogforsoksvesen. 1952. V. 12. P. 191–207.

## ASSESSMENT OF POTENTIAL PRODUCTIVITY OF TREE STANDS BASED ON FOREST PLANNING MATERIALS (ON THE EXAMPLE OF «AZAS» STATE NATURAL RESERVE)

S. K. Farber, N. S. Kuzmik

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch  
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

---

E-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, kuzmik@ksc.krasn.ru

On the example of the Azas State Natural Reserve, the potential productivity of forest stands is considered depending on the indicators of forest growth conditions. Multiple regression equations are formed. The class of productivity (bonitet) is used as a function. Initial information for drawing up the equations - materials of forest planning and data of digital elevation model. Soil, moisture and heat are the main factors affecting the development of the stands. The heat supply of locations is considered as a derivative of relief parameters. Soil moisture and fertility indicators of locations are constructed based on the characteristics of forest inventory indicators. The Siberian larch and the Siberian stone pine forests are found throughout almost the entire high-altitude profile of forests in the reserve: the range of absolute heights of larch about 1600 m, the Siberian stone pine – 2200 m, Scotch pine – 700 m, the Siberian spruce – 500 m. It turns out that the vertical temperature gradient significantly affects the representation of tree species in the high-altitude zones of the reserve, but practically does not affect the productivity of the stands. A significant decrease in the class of bonitet as the climb is observed only in larch stands. The effect of slope on productivity is not observed. The ranked number of soil moisture is demonstrated relative to the generalized qualitative indicator of forest-growing conditions of the forest type. There is a statistically significant relationship between the index of forest growth conditions and soil types. It is revealed that the class of bonitet of Scotch pine stands is determined mainly by soil moisture; in larch stands there is a dependence of the class of bonitet on the absolute height of the terrain, humidity and soil fertility; the productivity of the Siberian stone pine and the Siberian spruce stands naturally depends on soil moisture and fertility. Mapping of the potential productivity of stands is made by the values of the absolute height, soil moisture, and soil fertility of forest inventory compartments. Visual analysis of the map shows: on the best mode of moisture and soil fertility, located on the heated areas, can potentially grow more productive stands; it is established that within the reserve the most favorable forest conditions have developed on the terraces of the Azas river, meadows, forest-steppe areas; as elevation increases, forest conditions deteriorate.

**Keywords:** *forest vegetation conditions, forest types, productivity class (bonitet), moisture and fertility, relief.*

**How to cite:** *Farber S. K., Kuzmik N. S. Assessment of potential productivity of tree stands based on forest planning materials (on the example of «Azas» state natural reserve) // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2019. N. 3. P. 12–25 (in Russian with English abstract and references).*