

УДК 502/504:630\*17:582.475.4 (470.57)

И.Р. РАХМАТУЛЛИНА<sup>1</sup><sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы», г. Уфа, Российская ФедерацияЗ.З. РАХМАТУЛЛИН<sup>2</sup>, Э.Р. ЛАТЫПОВ<sup>2</sup><sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», г. Уфа, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ И АНАЛИЗ ВКЛАДА ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОБОНИТЕТНЫХ НАСАЖДЕНИЙ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) В ПРОГРАММЕ МАХЕНТ (НА ПРИМЕРЕ БУГУЛЬМИНСКО-БЕЛЕБЕЕВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ В ПРЕДЕЛАХ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН)

В программе MaxEnt (*Maximum Entropy Species Distribution Modelling*) смоделировано пространственное распространение условий для формирования высокобонитетных сосновых насаждений Бугульминско-Белебеевской возвышенности. Исходными материалами для построения факторов среды послужили климатические данные WorldClim, производные растры, полученные по цифровой модели рельефа SRTM-3, региональные почвенные карты и векторные слои дорог из OpenStreetMap. Местоположения высокобонитетных сосняков определены по материалам лесоустройства и космическому снимку Landsat 8 OLI. Манипуляции с векторными и растровыми слоями осуществлялись в программных продуктах со свободной лицензией SAGA GIS и QGIS. Расчетная модель демонстрирует приемлемое качество – значение AUC (*area under receiver operating characteristic (ROC) curve* – площадь под ROC-кривой) составила 0,78 ед. По результатам моделирования выделены три зоны концентрации оптимальных условий, самая крупная из них на севере возвышенности – в Бакалинском и Шаранском районах, поменьше – в центрально-западной (Туймазинский район) и центрально-восточной (Белебеевский район) частях возвышенности. Общая площадь сосняков с бонитетами 1А и 1Б – 5,5 тыс. га, благоприятные условия для их роста моделируются на площади 14,8 тыс. га. Определяющее влияние в расчетной модели принадлежит факторам «Максимальная температура наиболее теплого месяца» (вклад – 47,0%), «Топографический индекс влажности» (вклад – 14,5%) и «Среднесуточная температурная амплитуда» (вклад – 10,9%). Значимость этих факторов согласуется с данными литературы по экологии сосновых насаждений. Выявленные местоположения с лучшими прогнозными условиями могут служить дополнительным обоснованием при создании высокопроизводительных лесных культур сосны.

*Высокобонитетные сосняки, факторы среды, биоклиматические данные, цифровая модель рельефа, почвы, близость дорог, важность при пермутации.*

**Введение.** Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – одна из наиболее хозяйственно ценных лесобразующих древесных пород, отличающаяся неприхотливостью к лесорастительным условиям, относительно быстрым ростом и большими запасами стволовой древесины в условиях Республики Башкортостан. На Бугульминско-Белебеевской возвышенности имеются уникальные высокопроизводительные сосняки, выполняющие разнообразные экологические функции. Значительные площади сосновых монокультур создавались в рамках облесения крутосклонных и эродированных земель в 70-90-е гг. прошлого века.

Несмотря на распространенность сосны в антропогенно трансформированных экотопах и высокую устойчивость к действию экологических факторов развитие насаждений во многом определяется особенностями условий произрастания [1, 2]. Вид находится в равновесии с окружающей средой и наибольшей продуктивности достигает там, где климатические, ландшафтные и прочие условия наиболее благоприятны для него. Проанализировать вклад этих факторов можно в ходе моделирования экологической ниши как многомерного объекта в пространстве осей переменных факторов

среды, потенциально определяющих свойства исследуемых объектов [3].

В ходе практических апробаций моделирования экологической ниши построением моделей ареалов большую популярность приобретает метод максимальной энтропии [4, 5], в частности, реализованный в программе MaxEnt (Maximum Entropy Species Distribution Modelling), как один из эффективных методов моделирования распределения видов на основании данных только о присутствии вида [3, 6].

Суть моделирования состоит в следующем. Для «точек присутствия» вида рассчитывается распределение значений факторов среды. На основе их анализа присуждаются «веса» факторам и строится модель ареала. Далее выявляются участки местности с характеристиками, удовлетворяющими модели, и экстраполируется вероятность обнаружения вида на анализируемой территории. Принцип максимальной энтропии предусматривает, что в дискретных распределениях энтропия максимальна, когда все случаи равновероятны, для биномиального распределения вероятность  $p = 0,5$ . Моделирование начинается с равновероятного распределения, затем постепенно уточняется в зависимости от введенных ограничений – факторов среды [4, 5].

Ввиду того, что сосняки возвышенности на 90% являются лесными культурами, применение к ним механизма моделирования экологической ниши построением модели ареала является не совсем корректным. Поэтому применительно к ним предлагаются входные данные: «точки присутствия» вида заменить координатными точками только высокобонитетных сосняков как наиболее отзывчивых на факторы среды. Тогда результаты моделирования MaxEnt покажут рассчитанную вероятность благоприятных условий для формирования высокобонитетных сосняков, а значит, и наиболее пригодные для посадки и выращивания искусственных насаждений.

Цель исследования – создать модель пространственного распространения условий для роста высокобонитетных сосняков Бугульминско-Белебеевской возвышенности в программе MaxEnt и проанализировать ее результаты.

**Материал и методы.** В работе использована программа MaxEnt версии 3.3.3k [7]. Моделирование проводилось с параметрами, установленными по умолчанию. Для статисти-

стической оценки использован показатель AUC (area under receiver operating characteristic (ROC) curve – площадь под ROC-кривой). AUC измеряет способность модели различать места, где вид присутствует или отсутствует. Его значения изменяются от 0 до 1, при этом 1 означает полную дискриминацию, 0,5 – на уровне случайной. Оценка влияния факторов проводилась по параметру «Важность при пермутации» (permutation importance), по которому вклад каждой переменной определяется посредством случайного изменения её значений и измерения уменьшения AUC. Значительное уменьшение свидетельствует о сильной зависимости модели от данного фактора [4, 5].

Для построения переменных, описывающих морфометрические характеристики рельефа, была использована глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР), полученная в результате радиолокационной съемки Shuttle radar topographic mission (SRTM), с пространственным разрешением «3 x 3 угловые секунды» [8]. В программе SAGA GIS – System for Automated Geoscientific Analyses [9] – была произведена обработка ЦМР, преобразование географической системы координат в прямоугольную и построение растровых карт. Среди них для моделирования отобраны гипсометрическая карта, экспозиции склонов и топографического индекса влажности.

Для построения переменных, описывающих климатические градиенты, использована база глобальных климатических данных «WorldClim» с разрешением 1 км [10]. Из этой базы были получены 19 биоклиматических переменных, из которых исключены наиболее коррелируемые (коэффициент корреляции  $r > 0,7$ ) с гипсометрической картой и между собой. В итоге оставлены среднесуточная амплитуда, максимальная температура наиболее теплого месяца, количество осадков в наиболее сухой месяц.

Для отображения особенностей почвенного покрова были отобраны данные о типах почв, гранулометрическом составе и мощности гумусового горизонта из атласа Республики Башкортостан [11]. Эти карты сначала были векторизованы в виде полигональных объектов. В их атрибутах прописывались порядковые номера почв, которые затем в процессе растеризации присваивались каждой ячейке.

В качестве фактора антропогенной нагрузки выбран показатель близости дорог

федерального, регионального и районного значений. Растр близости был построен при помощи инструмента «Proximity» (Raster Distance) в программе QGIS [12]. Данные о дорогах были загружены из базы данных OpenStreetMap [13] с использованием QuickOSM Plugin для QGIS.

Все растры проверялись на мультиколлинеарность с помощью создания

7,6 тыс. рандомизированных векторных точек с атрибутами растровых карт, которые анализировались в Microsoft Excel с помощью инструмента Correlation. Редуцированные градиенты среды (рис. 1) преобразованы в формат Arc/Info ASCII Grid с едиными географическими характеристиками (система координат, экстенд, размер пикселя).

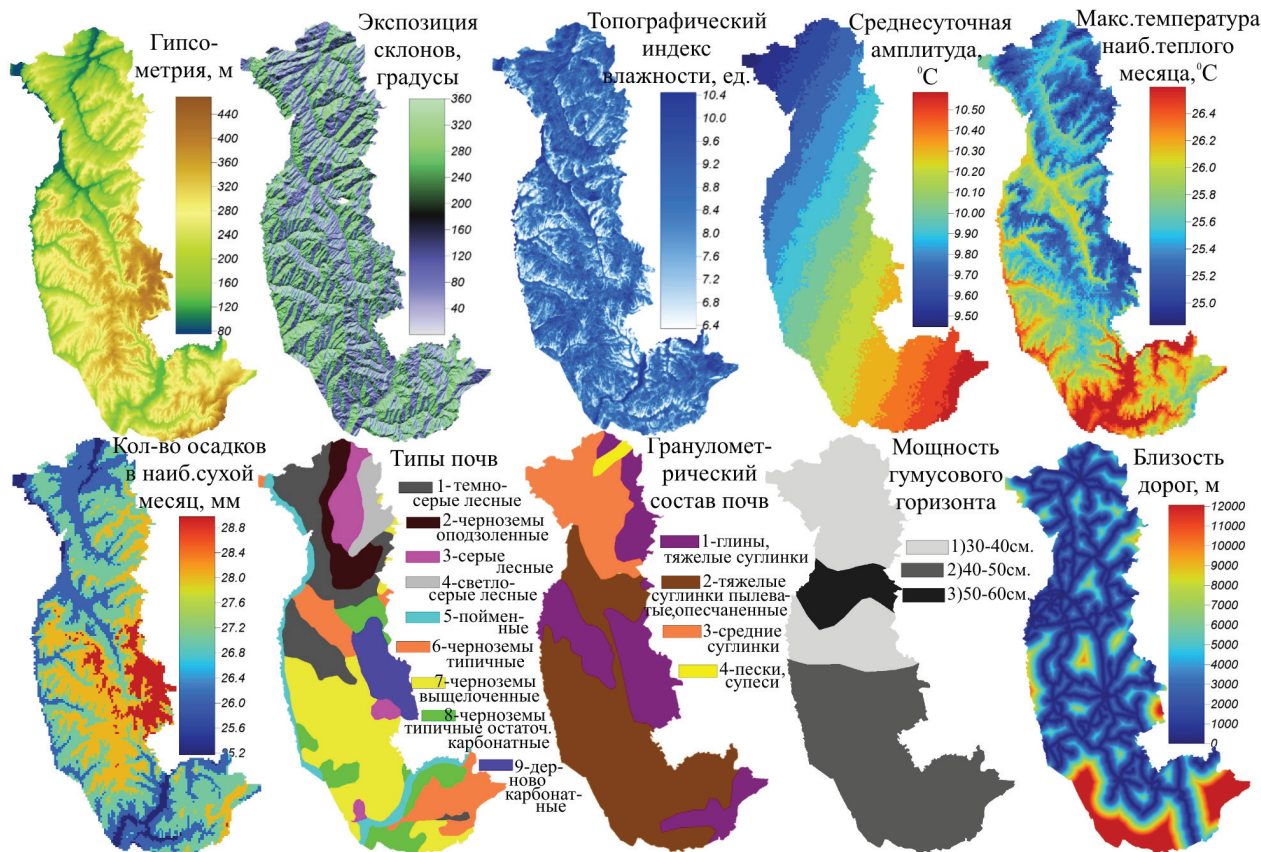


Рис. 1. Факторы среды, используемые при моделировании

Местоположения высокобонитетных сосновых насаждений отображены по результатам лесоинвентаризации – таксационных описаний 28 участков лесничеств. С помощью конструктора запросов в QGIS отображены выделы, в которых в качестве главной породы выступает сосна с бонитетами 1А и 1Б. Эти полигональные векторные слои преобразованы в точечные с плотностью одна точка на один пиксель карт переменных среды. Чтобы исключить точки, которые не являются сосной в смешанных по составу выделах, была осуществлена следующая работа. Из архива Геологической службы США (USGS) [14] был загружен снимок Landsat 8 от 25.05.2016 г. с пространственным разрешением 30 м/пиксель. К нему была применена радиометрическая коррекция (инструмент Top of Atmosphere

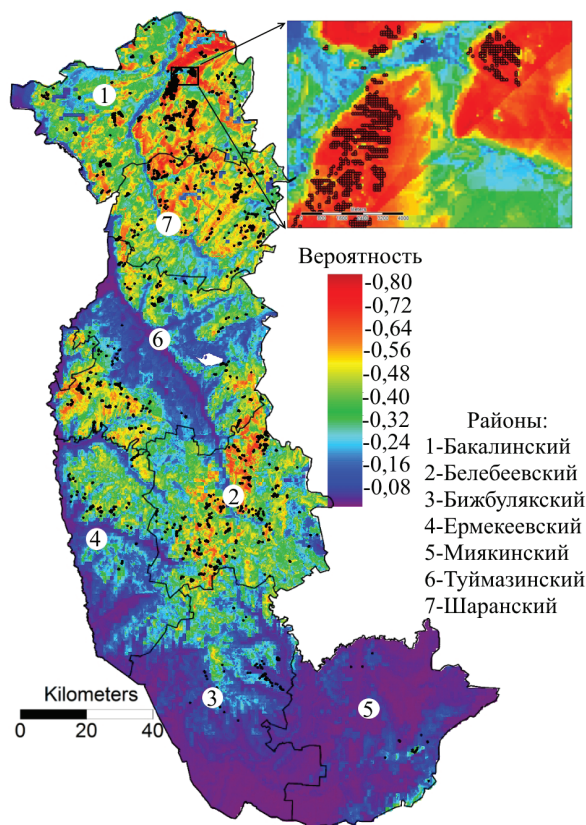
Reflectance SAGA GIS), и на территории лесного фонда осуществлена неуправляемая классификация изображения алгоритмом ISODATA с выделением 10 классов, 2 из которых интерпретированы как хвойные. Геометрическое пересечение «хвойных», полученных по космическому снимку, и «сосняков с бонитетами 1А и 1Б», отобранных по таксационным описаниям, дало «точки присутствия» высокобонитетных сосняков без смешения с другими породами, позволило устранить погрешности при векторизации лесохозяйственных выделов и учесть изменения, произошедшие после лесоустройства.

**Результаты и обсуждение.** Расчетная модель распространения условий для роста высокобонитетных сосняков демонстрирует приемлемое качество: значение



AUC составило 0,78. Это свидетельствует о надежности модели [4] и означает 78%-ную вероятность того, что места, где предсказаны лучшие или худшие условия, реально являются таковыми. По результатам моделирования выделяются три зоны концентрации оптимальных условий: самая крупная – на севере, поменьше – в центрально-западной и центрально-восточной

частях возвышенности (рис. 2). В разрезе административных районов наиболее благоприятные условия моделируются в Бакалинском районе на площади свыше 11 тыс. га, в т.ч. на 1,4 тыс. га – с высокой вероятностью ( $p > 0,75$ ). Это согласуется с реальной обстановкой: здесь наибольшая доля высокобонитетных сосняков – 32% от всей площади сосновых насаждений.



**Рис. 2. Вероятность подходящих условий для роста высокобонитетных сосняков (черными кружками обозначены «точки присутствия»)**

В Белебеевском районе отмечаются наибольшие площади сосновых насаждений – 10,5 тыс. га. Высокобонитетными среди них являются 10%, и эту площадь, исходя из результатов моделирования, можно увеличить вдвое. В Шаранском районе сосняков поменьше, доля высокобонитетных – 29%, наблюдается возможность их увеличения наполовину. В Туймазинском районе имеются 8,6 тыс. га сосняков, из них высокобонитетных – 10%. Но по сочетанию факторов благоприятные условия моделируются всего на 0,2 тыс. га, что значительно меньше реальных площадей. В Бижбулякском, Ермекеевском и Миякинском районах доли сосняков, в том числе и высокобонитетных, незначительны, отчасти поэтому здесь моделируются неблагоприятные условия. В це-

лом по возвышенности сосняков с бонитетами 1А и 1Б – 5,5 тыс. га, площадь участков с благоприятными условиями для их роста составляет 14,8 тыс. га.

Наибольшее влияние в расчетной модели принадлежит биоклиматическому фактору «Максимальная температура наиболее теплого месяца», его вклад по пермутационному тесту составляет 47,0%. Значительное влияние фактора объясняется тем, что градиент его значений совпадает с характером общих изменений погодноклиматических условий, а именно с повышением температуры и уменьшением количества осадков с севера возвышенности на юг и с пониженных участков к водораздельным линиям. Значимость климатических факторов согласуется с данными литера-

туры, в которых отмечается тесная связь радиального прироста древостоев сосны с погодными условиями, в первую очередь – с температурой воздуха [15]. Из графика отклика (рис. 3) следует, что благоприятные лесорастительные условия складываются на территориях с узким диапазоном этого фактора – 25,1-25,6°C. Такие условия характерны для 38% территории возвышенности.

Температура вне этого диапазона снижает вероятность роста высокопродуктивных сосняков. Если влияние высоких температур проявляется ухудшением роста древостоев, то отрицательное воздействие относительно низких значений скорее всего объясняется тем, что на возвышенности участков с температурой 24,8-25,1°C всего 3%, и поэтому здесь просто нет «точек присутствия».

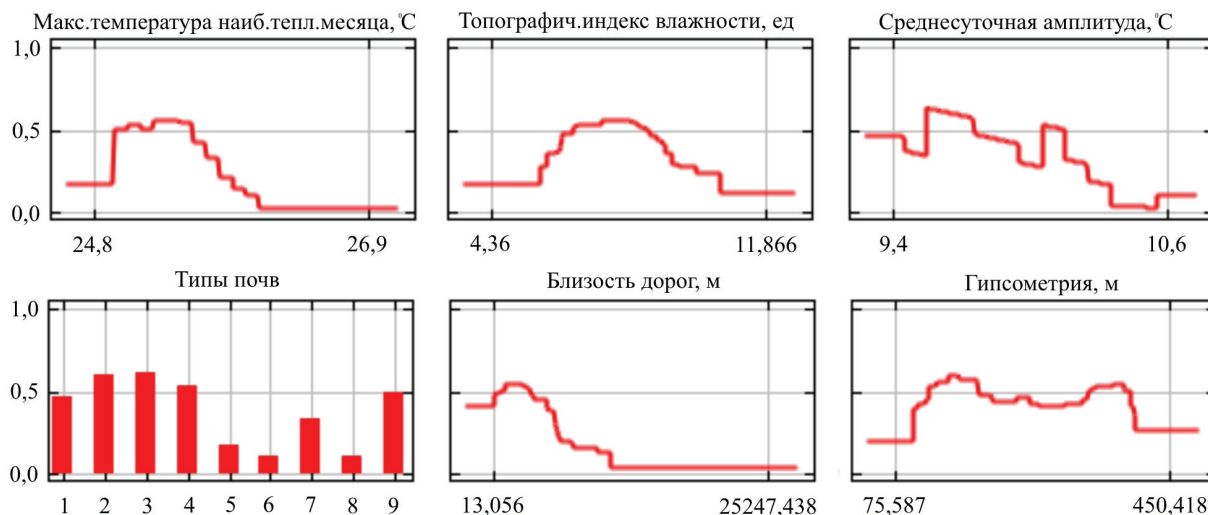


Рис. 3. Графики откликов «точек присутствия» высокобонитетных сосняков на факторы среды (обозначение типов почв приведено на рисунке 1)

Вклад еще одного биоклиматического фактора – среднесуточная амплитуда – составляет 10,9%. Его график показывает устойчивую тенденцию: с увеличением разницы дневной и ночной температуры вероятность формирования высокобонитетных древостоев падает.

Вторая по значимости переменная среды, выявленная при пермутационном тесте, – топографический индекс влажности (TWI) с вкладом 14,5%. Экологический оптимум увлажнения складывается в интервале 6,5-8,5 ед. Сосна переносит увлажнение, но в этих условиях снижается ее прирост и производительность [15]. С действием TWI схожим является влияние гипсометрии (вклад в модель – 4,3%). Низкие высоты приурочены к поймам рек, высокие – к пикам, ветроударным склонам, водораздельным линиям, на которых складываются неблагоприятные климатические и почвенные условия.

Из представленных типов почв (вклад фактора – 8,4%) наибольшую вероятность высокого бонитета иллюстрируют черноземы оподзоленные, серые-лесные и светло-серые лесные почвы. Бонитет сосняков на темно-серых и дерново-карбонатных типах характеризуется максимальной неопре-

деленностью с вероятностью:  $p = 0,5$ . Вклад таких эдафических факторов, как гранулометрический состав почв и мощность гумусового горизонта, составляет менее 2,4%. Это подтверждает то, что сосна обыкновенная относится к пластичной породе и не является требовательной к плодородию почв, способна существовать в весьма трудных условиях, обходясь односторонне развитой корневой системой, использующей сравнительно небольшой объем почвы [2].

Вклад антропогенного фактора, выраженного через близость к автомобильным дорогам, составляет 8,1%. Благоприятные условия смоделированы на участках, удаленных от дорог на 1,5-3,5 км. Более близкое соседство характеризуется различными видами загрязнений, что вместе с высокой газопоглощательной способностью сосны негативно сказывается на ее росте. На участках с транспортной недоступностью (удаленность – 3,6-25,8 км) малая вероятность связана с трудностью при посадке и уходе за лесными культурами и расположением этих участков на южных границах возвышенности, где лимитирующими выступают другие факторы среды, рассмотренные выше.

### Выводы

Результаты моделирования на основе корреляций местоположения высокобонитетных сосняков с биоклиматическими, почвенными, орографическими и антропогенными факторами по методу максимальной энтропии выглядят вполне приемлемыми. Снижение показателя AUC до 0,78, может быть следствием неучтенных факторов: например, не удалось отразить качество и своевременность рубок ухода за лесом, избежать высокой генерализованности почвенных карт. Однако основные переменные среды, которые оказывают влияние на рост и развитие лесных насаждений, рассмотрены. Главными из них оказались температура и влажность, выраженные через максимальную температуру наиболее теплого месяца, среднесуточную амплитуду и топографический индекс влажности.

Площадь выделенных зон с лучшими прогнозными условиями в 2,4 раза больше существующих площадей высокобонитетных сосняков, что служит теоретическим обоснованием создания на территории Бугульминско-Белебеевской возвышенности лесных культур сосны и получения в будущем высокопродуктивных искусственных насаждений.

### Библиографический список

- Кулагин Ю.З. Хвойные лесобразователи и экологическое прогнозирование // Экология хвойных. Уфа: БФАН, 1978. С. 5-21.
- Зайцев Г.А., Кулагин А.Ю. Сосна обыкновенная и нефтехимическое загрязнение: дендрэкологическая характеристика, адаптивный потенциал и использование. М.: Наука, 2006. 124 с.
- Пузаченко Ю.Г., Кузьмин С.Л., Сандлерский Р.Б. Количественная оценка параметров ареалов (на примере представителей рода *Rana*) // Журнал общей биологии. 2011. Т. 72. № 5. С. 339-354.
- Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions // Ecological Modeling. 2006. V. 190. P. 231-259.
- Phillips S.J., Dudic M. Modelling of species distribution with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation // Ecography. 2008. V. 31. P. 161-175.
- Дудов С.В. Моделирование распространения видов по данным рельефа и дистанционного зондирования на примере сосу-  
дистых растений нижнего горного пояса хр. Тукуринга (Зейский заповедник, Амурская область) // Журнал общей биологии. 2016. Т. 77. № 1. С. 16-28.
- Maxent software for species habitat modeling. V. 3.3.3k [Электронный ресурс] // URL: <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/> (дата обращения: 07.02.2017 г.).
- CGIAR-CSI SRTM 90m DEM Digital Elevation Database [Электронный ресурс] // URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/> (дата обращения: 28.10.2016 г.).
- SAGA – System for Automated Geoscientific Analyses. V. 3.0.0 [Электронный ресурс] // URL: <http://www.saga-gis.org/en/index.html> (дата обращения: 20.11.2016 г.).
- WorldClim – Global Climate Data. Free climate data for ecological modeling and GIS [Электронный ресурс] // URL: <http://www.worldclim.org/bioclim> (дата обращения: 07.02.2017 г.).
- Атлас Республики Башкортостан [Карты]. Уфа, 2005. 420 с.
- QGIS. V. 2.18.2 [Электронный ресурс] // URL: <http://www.qgis.org/ru/site/> (дата обращения: 28.10.2016 г.).
- OpenStreetMap [Электронный ресурс] // URL: <http://openstreetmap.org> (дата обращения: 28.10.2016 г.).
- EarthExplorer [Электронный ресурс] // URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 28.10.2016 г.).
- Основы лесной биогеоэкологии / Под ред. В.Н. Сукачева, Н.В. Дыблиса. М., 1964. 574 с.

Материал поступил в редакцию 19.03.2017 г.

### Сведения об авторах

**Рахматуллина Ирина Римилевна**, кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «БГПУ им. М. Акмуллы»; Россия, 450000, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, 3а; e-mail: rahmat\_irina@mail.ru

**Рахматуллин Загир Забирович**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и ландшафтного дизайна ФГБОУ ВО «Башкирский ГАУ»; Россия, 450001, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34; e-mail: zagir1983@mail.ru

**Латышов Эльдар Рафилевич**, аспирант ФГБОУ ВО «Башкирский ГАУ»; Россия, 450001, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34.

**I.P. RAKHMATULLINA<sup>1</sup>**

Federal state budgetary educational institution of higher education «Bashkir state pedagogical university named after M. Akmully», Ufa, Russian Federation

**Z.Z. RAKHMALULLIN<sup>2</sup>, E.R. LATYPOV<sup>3</sup>**

Federal state budgetary educational institution of higher education «Bashkir state agrarian university», Ufa, Russian Federation

## **SIMULATION OF GROWING CONDITIONS AND ANALYSIS OF FACTORS CONTRIBUTION IN FORMATION OF HIGH BONITET PLANTINGS OF PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) IN THE PROGRAM MAXENT (BY THE EXAMPLE OF THE BUGULMINSKO-BELEBEEVSKY UPLAND WITHIN THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN**

*In the program MaxEnt (Maximum Entropy Species Distribution Modeling) spatial distribution of conditions is simulated for formation of highly bonitetny pine plantations on the territory of the Bugulminsko-Belebевsky upland. The initial materials for building environmental factors were the WorldClim data, derivative rasters obtained according to the relief model SRTM-3, regional soil maps and vectorial road layers from OpenStreetMap. The location of highly bonitet pine plantations are defined according to the materials of forest management and satellite image of Landsat 8 OLI. Manipulations with vector and raster layers were carried out in the software with a free license SAGA GIS and QGIS. The rated model shows the acceptable quality – AUC value (area under receiver operating characteristic (ROC) curve is 0.78 units. According to the simulation results three areas of concentration of optimum conditions were singled out, the largest one is in the Northern part of the upland – in Bakalinsky and Sharansky districts, the smaller ones are – in the Central-Western (Tuimazinsky district) and Central- Eastern part (Belebевsky district) of the upland. The total area of pine forests with bonitets 1A and 1B – 5.5 thousand hectares, favorable conditions for their growth are simulated on the area 14.8 thousand ha. The determining influence in the rated model belongs to the factors «Max temperature of the warmest month (contribution is 47.0%). «Topographic humidity index» (contribution is 14.5%) and «Average temperature amplitude» (contribution is 10.9%). The value of these factors agrees with the literature data on the ecology of pine plantations. The identified locations with the best predicted conditions may serve as an additional substantiation when creating of highly productive pine forest crops.*

*High bonitet pine forests, environmental factors, bioclimatic data, digital relief model, soil, closeness to roads, importance at permutation.*

### **References**

1. Kulagin Yu.Z. Hvoynye lesoobrazovateli i ekologicheskoe prognozirovaniye // *Ecologiya hvoinyh*. Ufa: BFAN, 1978. S. 5-21.
2. Zaitsev G.A., Kulagin A.Yu. Sosna obyknovennaya i neftehimicheskoe zagryaznenie: dendroecologicheskaya harakteristika, adaptivnyy potentsial i ispolzovanie. M.: Nauka, 2006. 124 s.
3. Puzachenko Yu.G., Kuzjmin S.L., Sandler-sky R.B. Kolichestvennaya otsenka parametrov arealov (na primere predstavitelej roda Rana) // *Zhurnal obshchej biologii*. 2011. T. 72. № 5. S. 339-354.
4. Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions // *Ecological Modeling*. 2006. V. 190. P. 231-259.
5. Phillips S.J., Dudic M. Modelling of species distribution with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation // *Ecography*. 2008. V. 31. P. 161-175.
6. Dudov S.V. Modelirovaniye rasprostraneniya vidov po dannym reljefa i distantsionnogo zondirovaniya na primere sosudistykh rasteniy nizhnego gornogo poyasa hr. Tukuringa (Zejsky zapovednik, Amurskaya oblastj) // *Zhurnal obshchej biologii*. 2016. T. 77. № 1. S. 16-28.
7. Maxent software for species habitat modeling. V. 3.3.3k [Electronny resurs] // URL: <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/> (data obrashcheniya: 07.02.2017 g.).
8. CGIAR-CSI SRTM 90m DEM Digital Elevation Database [Electronny resurs] // URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/> (дата обращения: 28.10.2016 g.).
9. SAGA – System for Automated Geoscientific Analyses. V. 3.0.0 [Electronny resurs] // URL: <http://www.saga-gis.org/en/index.html> (data obrashcheniya: 20.11.2016 g.).
10. WorldClim – Global Climate Data. Free climate data for ecological modeling and GIS [Electronny resurs] // URL: <http://www>.



worldclim.org/bioclim (data obrashcheniya: 07.02.2017 g.).

11. Atlas Respubliki Bashkortostan [Karty]. Yfa, 2005. 420 s.

12. QGIS. V. 2.18.2 [Electronny resurs] // URL: [http://www.qgis.org/ru/site/\(data obrashcheniya: 28.10.2016 g.\)](http://www.qgis.org/ru/site/(data obrashcheniya: 28.10.2016 g.)).

13. OpenStreetMap [Electronny resurs] // URL: <http://openstreetmap.org> (data obrashcheniya: 28.10.2016 g.).

14. EarthExplorer [Electronny resurs] // URL: [https://earthexplorer.usgs.gov/\(data obrashcheniya: 28.10.2016 g.\)](https://earthexplorer.usgs.gov/(data obrashcheniya: 28.10.2016 g.)).

15. Osnovy lesnoj biogeotsenologii / Pod red. V.N. Sukacheva, N.V. Dylisa. M., 1964. 574 s.

The material was received at the editorial office  
19.03.2017

#### Information about the authors

**Rahmatullina Irina Rimilevna**, candidate of biological sciences, senior lecturer of the chair of ecology and environmental engineering FSBEI HE «BSPU named after M. Akmully»; Russia, 450000, Ufa, ul. Oktyabrskoj revolyutsii 3a; e-mail: rahmat\_irina@mail.ru

**Rahmatullin Zagir Zabirovich**, candidate of agricultural sciences, associate professor of the chair of forestry and landscape design FSBEI HE «Bashkirsky SAU»; Russia, 450001, Ufa, ul. 50 let Oktyabrya, 34; e-mail: zagir1983@mail.ru

**Latypov Eljdar Rafiljevich**, post graduate student «Bashkirsky SAU»; Russia, 450001, Ufa, ul. 50 let Oktyabrya, 34; e-mail: zagir1983@mail.ru

УДК502/504: 630\*17:582.475.2 (470.311)

**В.К. ХЛЮСТОВ, Н.В. КОРЕШКОВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

## СИСТЕМАТИЗАЦИЯ РОСТА И ПРОДУКТИВНОСТИ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КУЛЬТУР ЛИСТВЕННОЙ СИБИРСКОЙ (*LARIX SIBIRICA*)

*Цель работы заключается в выявлении закономерностей возрастной динамики таксационных показателей роста и продуктивности географических культур лиственницы сибирской, достигших 60-летнего возраста, в условиях мезофильных (свежих) сложных суборей (С<sub>2</sub>). Объекты представлены 14 экотипами лиственницы с начальной густотой посадки 2-летними сеянцами в количестве 8 тыс. шт/га. Возрастная динамика роста и продуктивности экотипов лиственницы описана многомерной асинхронно динамической моделью, сочетающей ростовую функцию и происхождение семян, закодированное бинарными (блоковыми фиктивными) переменными. При завышенной густоте посадки экотипов лиственницы (8 тыс. шт/га) возраст количественной спелости культур варьируется от 35 до 55 лет, что значительно ниже, чем в естественно формирующихся насаждениях лиственницы сибирской в 80 лет. Даны рекомендации по выявлению наиболее продуктивных и экологически устойчивых экотипов. Ранжирование экотипов по продуктивности характеризуется рядом: Омская область, Тарский р-н; Р. Хакассия, Сонский р-н; Московская обл., Краснопахорский р-н; Московская обл., Бронницкий р-н; Московская обл., Бронницкий р-н (лучи.); Иркутская обл., Братский р-н; Тюменская обл., Ханты-Мансийский р-н; Красноярский край, Ермаковский р-н; Красноярская обл., Ирбейский р-н; Новосибирская обл., Тогучинский р-н; Красноярский край, Енисейский р-н; Р. Бурятия, Кяхтинский р-н; Р. Тыва, Кызылский р-н; Красноярский край, Туруханский р-н. Изменение высоты от толщины деревьев (графиков высот) лиственницы зависит от величины среднего диаметра и средней высоты древостоев и отображается трёхпараметрической полиномологарифмической регрессией. Возрастная динамика роста и продуктивности географических культур лиственницы отображается многомерной асинхронно экотипной моделью, сочетающей ростовую функцию и происхождение семян, закодированное бинарными (блоковыми фиктивными) переменными. Чем раньше наступает возраст кульминации прироста по средней высоте и среднему диаметру экотипа, тем быстрее он снижается с возрастом древостоя.*

*Лиственница, географические культуры, экотипы, возрастная динамика роста, дендрометрические показатели роста, запас стволовой древесины.*