

Экология

УДК 581.9

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-3-11

Биоклиматическое моделирование ареала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Якутии

А.П. Исаев^{1,2}, Б.З. Борисов¹, Е.Н. Никифорова¹

¹Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия

²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия
alex_isaev@mail.ru

Аннотация. С помощью геоинформационного моделирования в программной среде MaxEnt была создана биоклиматическая модель ареала сосны обыкновенной – *Pinus sylvestris* L., на основе которой построена новая карта ареала этого вида с зонированием на «предпочтительные», «пригодные» и «мало пригодные» местопроизрастания. Также были выявлены климатические факторы, ограничивающие ареал этого вида на территории Республики Саха (Якутия), и оценена их роль в создании модели (%). К этим факторам относятся: Bio 01 – среднегодовая температура (значение вклада в модель 52,2 %) и Bio 08 – средняя температура самой влажной четверти года (34,5 %). Остальные биоклиматические переменные имели слишком высокий коэффициент пермутации, или же их значение вклада в модель меньше 1 %. С помощью вегетационного индекса EVI была проведена верификация модели. Схожесть данных модели MaxEnt и положительных значений индекса EVI за апрель 2016 г. была оценена в 69,5 %. Данные проведенного анализа могут послужить основой для создания новой карты ареала сосны обыкновенной на территории не только Якутии, но и всей Северной Евразии. Кроме того, модель позволяет понять, как изменится породный состав лесов, лесистость Якутии при различных климатических сценариях.

Ключевые слова: ГИС, WorldClim, *Pinus sylvestris*, Якутия, биоклиматические переменные, ареал сосны обыкновенной, карта.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания ИБПК СО РАН на 2017-2021 гг. по теме: «Фундаментальные и прикладные аспекты изучения разнообразия растительного мира Северной и Центральной Якутии» (рег. номер AAAA-A17-117020110056-0).

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-3-11

Bioclimatic modeling of the distribution of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) in Yakutia

A.P. Isaev^{1,2}, B.Z. Borisov¹, E.N. Nikiforova¹

¹Institute of Biological Problems of Cryolithozone, SD RAS, Yakutsk, Russia

²M.K. Ammosov North-East Federal University, Yakutsk, Russia
alex_isaev@mail.ru

Abstract. A bioclimatic model of the distribution of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) was created using geoinformation modeling in the MaxEnt. The new map of this species was built with the differentiation into “preferred”, “suitable” and “not suitable” locations. Climatic factors limiting the range of this species in the Republic of Sakha (Yakutia) were identified, and their role in creating the model was estimated (%). These factors include Bio 01 – the average annual temperature (the contribution to the model is 52.2 %) and Bio 08 – the average temperature of the wettest quarter of the year (34.5 %). The remaining bioclimatic variables had a too high permutation coefficient, or their contribution to the model was less than 1 %.

Using the EVI vegetation index, the model was verified. The similarity of the MaxEnt model data and the positive EVI values for April 2016 was estimated at 69.5 %. The data of the analysis can serve as the basis for creating a new map of the area of Scotch pine not only in Yakutia, but throughout Northern Eurasia. In addition, the model allows us to understand how the species composition of forests and the forest cover of Yakutia will change under various climatic scenarios.

Key words: GIS, WorldClim, *Pinus sylvestris*, Yakutia, bioclimatic variables, area of Scots pine, map.

Acknowledgements. This research was carried out within the framework of state assignment of IBPC SO RAN on 2017-2021 (project "Fundamental and applied aspects of the study of vegetation diversity of Northern and Central Yakutia" reg. no. AAAA-A17-117020110056-0).

ВВЕДЕНИЕ

Анализ литературных источников показал, что ранее основная часть авторов, исследовавших влияние параметров внешней среды на сосну обыкновенную, изучали реакцию вида на различные стрессовые ситуации [1, 2], связь продуктивности сосны с климатическими факторами [3–5]. Ряд работ посвящен особенностям газового обмена в условиях изменяющегося климата. В отношении использования данных дистанционного зондирования в картографировании выделяются работы, посвященные изменению границ лесных массивов [6], а также роли климата в видовом разнообразии деревьев [7].

Исследование влияния климатических факторов на распространение лесообразующих древесных пород является актуальной научной задачей. Изучая ареал древесного вида, можно прогнозировать ареал и других видов, чьи экологические характеристики тесно связаны с изучаемой древесной породой. Кроме того, вызывают интерес работы по изучению изменения границ растительных зон, в первую очередь продвижение границы леса. Чтобы прогнозировать изменения ареала того или иного вида, необходимо выяснить влияние климатических параметров на его распространение.

Объектом исследования в данной статье являются леса из *Pinus sylvestris*, занимающие в пределах среднетаежной подзоны Якутии 10,6 % от лесопокрытой площади [8]. В настоящее время картографическое отображение ареала *Pinus sylvestris* весьма схематично (рис. 1) и представляет собой зону сплошного распространения с указанием лишь северной границы [9]. То есть сведения об ареале вида мало информативны и требуют уточнений. Для этого мы решили воспользоваться методом максимальной энтропии с помощью программы MaxEnt.

Данный метод эффективно моделирует распределение видов на основании данных о присутствии вида, существенно превосходит другие

аналогичные методы – DOMAIN и BIOCLIM [10–13]. Успех использования этой программы основан на пяти основных преимуществах:

1) MaxEnt оценивает распределение подходящих условий обитания исследуемого вида в соответствии с принципами максимальной энтропии. Энтропия выражает меру непредсказуемости и неопределенности информации, или, другими словами, это количество информации, которое содержится в случайной изменчивости или неизвестной величине [14];

2) выходная растровая карта в формате ASCII состоит из ячеек, где прописаны числовые данные возможности присутствия вида по шкале от 0 до 1, с точностью до 6-го знака после запятой, что позволяет исследователям самим устанавливать порог достоверности пригодности местобитаний для каждого вида [15];

3) в отличие от других программ моделирования ареалов, MaxEnt не требует данных об отсутствии вида в тех или иных точках [16];

4) оценкой полученной модели является AUC (Area Under Curve), представляющая собой площадь под операционной кривой (Receiver Operating Curve). AUC измеряет способность модели различать пункты, где вид присутствует, и пункты, где он отсутствует, и изменяется от 0 до 1. При этом 1 означает полную дискриминацию, а 0,5 – что дискриминация не лучше случайной. Значение 85 % для AUC означает 85%-ю вероятность того, что в местах, где предсказано присутствие вида, он реально присутствует. Отличной считается AUC выше 0,9, хорошей – от 0,8 до 0,9 и приемлемой – от 0,7 до 0,8 [15, 17];

5) MaxEnt также может выявить роль каждой переменной в модели распределения и ее прогностическую значимость. Для этого предлагается два независимых метода – пермутация и jackknife-тест [17].

Методы моделирования ареалов с помощью программной среды MaxEnt чаще всего используются для изучения пространственного распре-

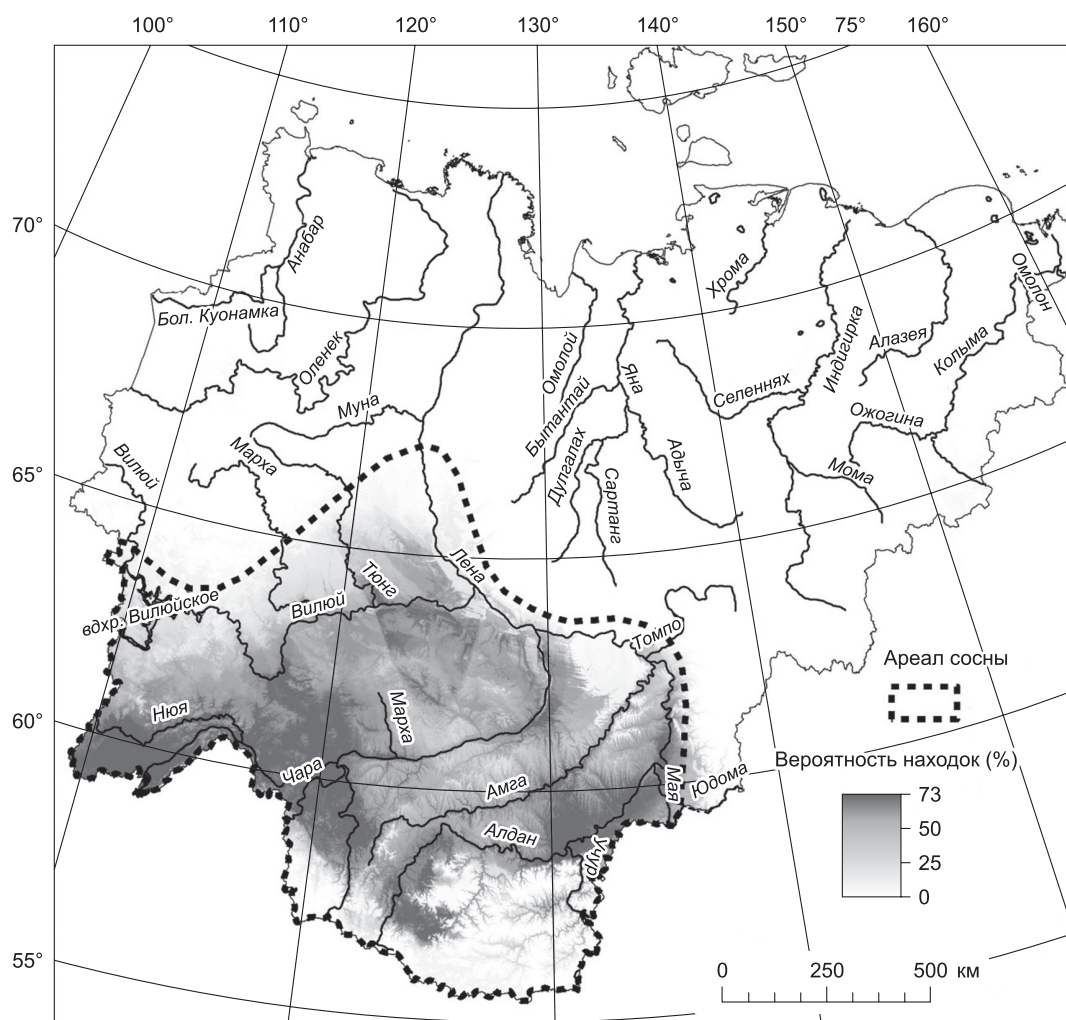


Рис. 1. Модель MaxEnt потенциального ареала сосны обыкновенной в сравнении с имеющейся в литературе границей ареала (штриховая линия) [9].

Fig. 1. MaxEnt model of the potential distribution of Scots pine in comparison with the publishing borderline of tree (dashed line) [9].

деления наземных млекопитающих и в меньшей степени его используют для изучения ареалов редких растений [18, 19] и опасных инвазий [20, 16], но практически не используют для изучения ареалов массовых видов. Это связано с тем, что прогнозирование и картирование потенциально пригодных местообитаний для редких и исчезающих видов имеет приоритетное значение для мониторинга их состояния и возможного восстановления популяций [21].

В связи с вышесказанным мы решили провести работу по созданию модели ареала *Pinus sylvestris* в программной среде MaxEnt с использованием климатических параметров BioClimat, которые, по мнению R.J. Hijmans [22], являются наиболее важными в пространственном распре-

делении биологических видов. Тем самым, создав адекватную модель ареала *Pinus sylvestris*, можно выделить климатические параметры, которые определяют пространственное распространение вида на территории Якутии.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Якутия является самым большим субъектом Российской Федерации, ее площадь составляет 3103,2 тыс. км². Климат холодный континентальный, Средняя годовая температура отрицательна, амплитуда температур превышает 100°. Лето в Якутии короткое и теплое. Рельеф очень сложный, в основном горный (70 % занято горами, плоскогорьями и нагорьями). Северные и центральные районы представляют обширные

равнины. Территория Якутии в основном расположена в пределах двух ландшафтных зон – тундры и тайги [23]. Таежная зона – самый обширный биом. По данным на 1 января 2008 г. площадь лесного фонда составляет 256 млн га, или 82,5 % от всей территории Якутии. Основные древесные породы это виды рода лиственница (*Larix*) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*). Лиственничные леса занимают площадь 122,6 млн га, что составляет 77,5 % лесопокрытой площади. Леса из *Pinus sylvestris* на территории Якутии занимают площадь в 10,2 млн га – 6,5 % [18].

Для построения модели ареала *Pinus sylvestris* была использована программа MaxEnt 3.3.3k. В качестве файла, содержащего точки находок *Pinus sylvestris*, была использована векторная карта лесов в формате shp-файла, выполненная Сибирским отделением АН СССР в 1990 г. на основе «Атласа лесов СССР» [24]. Карта была

переведена нами из полигонального формата в точечный. Точки расставлялись на всех отдельных полигонах, на больших полигонах точки размещались с плотностью 1 точка на 10 тыс. га, всего точечный слой содержал 1181 элемент. Удалены ошибочные сведения, например, точки в районе п. Усть-Куйга (135°30' в.д., 69°59' с.ш.), где, по всей видимости, в качестве сосновых лесов выделены заросли кедрового стланика. В качестве тестовых при моделировании было использовано 25 % точек.

В качестве переменных для моделирования были использованы биоклиматические растры из базы геоданных WorldClim [25], имеющие пространственное разрешение ~1 км на пиксель. В этих растрах содержится информация по климатическим параметрам, которая представляет собой пространственную интерполяцию данных с метеостанций мира за период 1950–2000 гг.

Таблица 1

Вклад в модель ареала *Pinus sylvestris* и индекс важности пермутации для биоклиматических переменных

Table 1

Contribution to the *Pinus sylvestris* area model and permutation importance index for bioclimatic variables

Шифр	Описание переменной	Вклад в модель, %	Индекс важности пермутации, %
bio_01	Среднегодовая температура	52,2	29,3
bio_08	Средняя температура самой влажной четверти года	34,5	4,5
bio_10	Средняя температура самой теплой четверти	4,4	13,1
bio_05	Максимальная температура самого теплого месяца	2,6	3,8
bio_06	Минимальная температура самого холодного месяца	1,3	8,7
bio_15	Сезонность выпадения осадков (коэффициент вариации)	1,1	5,7
bio_19	Осадки самой холодной четверти года	0,7	3
bio_04	Температурная сезонность (стандартная девиация ×100)	0,7	2,3
bio_02	Средняя дневная разница температур (минимальная температура – максимальная температура)	0,6	3,3
bio_03	Изотермальность (BIO2/BIO7)(×100)	0,4	1,3
elev	Цифровая модель рельефа. Нулевая отметка от уровня Мирового океана	0,4	10,7
bio_09	Средняя температура самой сухой четверти года	0,3	1,9
bio_12	Среднегодовые осадки	0,3	7,7
bio_07	Годовой размах температур (BIO5–BIO6)	0,1	0,8
bio_13	Осадки самого влажного месяца	0,1	0,4
bio_16	Осадки самой влажной четверти года	0,1	0,2
bio_18	Осадки самой теплой четверти года	0	2,6
bio_11	Средняя температура самой холодной четверти года	0	0,2
bio_17	Осадки самой сухой четверти года	0	0
bio_14	Осадки самого сухого месяца	0	0

[22]. Эти 19 климатических переменных и их комбинации были выбраны на основе биологической значимости для распространения отдельных видов растений и прошли апробацию в других исследованиях [26–28] (см. таблицу). Цифровая модель рельефа (ЦМР), представляющая собой данные по высоте над уровнем мирового океана, также была получена с сайта WorldClim [25].

Окончательная обработка карты проводилась с помощью программы ArcGIS 10.1 © (Redlands, USA). Также была произведена оценка на чувствительность метода и определена степень влияния отдельных биоклиматических параметров на формирование карты ареала.

Для оценки эффективности модели MaxEnt мы использовали кривую операционных характеристик приемника ROC – Receiver operating characteristic curves [29]. Основное преимущество ROC-анализа заключается в том, что площадь под ROC-кривой (AUC) обеспечивает единую меру эффективности модели независимо от выбора порога [15]. Идеальным является значение $AUC = 1$, хотя в реальности оно всегда меньше [29, 30].

Как правило, значения AUC больше 0,7 рассматриваются как потенциально значимые, в то же время значения ниже 0,7 до 0,5 означают прогностическую дискриминацию, что можно трактовать как случайный результат [10].

Оценка важности биоклиматических переменных для модели проводилась по процентным вкладам этих переменных в модель. Определение числовых пороговых значений важных переменных, т. е. нахождение климатических границ экологической ниши, проводилось при оценке графиков «кривых реакции» (response curve).

Для верификации модели использованы данные MODIS, полученные со спутника TERRA, а именно вегетационный индекс EVI из комплекта данных MOD13A2, представляющий собой 16-дневные композиты в растровом формате HDF-EOS с пространственным разрешением 1 км (<https://modis-land.gsfc.nasa.gov/vi.html>). Актуальными были данные за 22 апреля 2016 г. Исследования показали, что в этот период вечнозеленые хвойные леса, к которым относятся и сосняки, имеют положительное значение индекса EVI, а лиственные леса имеют отрицательное или нулевое значение индекса EVI.

Проекция, размер ячейки сетки и их выравнивание в едином пространстве обрабатывались таким образом, чтобы гарантировать согласо-

ванность действий всех слоев данных с помощью программы ArcGIS 10.1 © (Redlands, USA). Все файлы были спроектированы в коническую проекцию Альберса (система координат WGS-84) с размером ячеек 1 на 1 км. Для пересчета всех переменных использовался метод кубической интерполяции. Также с помощью ArcGIS 10.1 были проведены все операции по анализу данных.

Статистический анализ был проведен в программной среде Microsoft Office Excel© (Redmond, USA)

Построение модели ареала. Итоговая растровая карта модели MaxEnt имеет следующий вид (см. рис. 1). На ней в числовой шкале от 0 до 0,75 показана вероятность находок сосны обыкновенной на территории Якутии. В исследованиях, проводимых с применением MaxEnt, достоверная вероятность находок оценивается выше 0,5, но иногда это значение может быть и меньше [26]. Для того чтобы оценить порог вероятности произрастания *Pinus sylvestris* в нашей модели, мы сравнили распределение точек находок, полученных с «Атласа лесов СССР» [24], с модельными данными вероятности находок. Статистический анализ показал, что основная часть точек находок (98 %) лежит в пределах от 0,25 до 0,75 выходных значений растров модели MaxEnt. Тем самым можно утверждать, что порог достоверности ареала сосны обыкновенной лежит в пределах от 0,25 и выше, но не превышает 0,75.

Определение числовых пороговых значений важных переменных. В ходе построения модели в программной среде MaxEnt были выявлены биоклиматические факторы, оказывающие наибольшее влияние на пространственное распространение сосны. К этим факторам относятся: Bio 01 – среднегодовая температура (51,1 %) и Bio 08 – средняя температура самой влажной четверти года (35,7 %), Bio 10 – средняя температура самой теплой четверти года (3,8 %). Остальные факторы имеют значения вклада в модель меньше 2 %.

Верификация модели. Для проверки нашей модели мы использовали данные вегетационного индекса EVI из комплекта данных MOD13. Исследования показали, что по весенним снимкам MODIS можно отделить лиственные леса от лесов, сложенных вечнозелеными породами. При этом необходимо учесть, что из вечнозеленых на территории Якутии самыми распространенными являются леса с доминированием *Pinus*

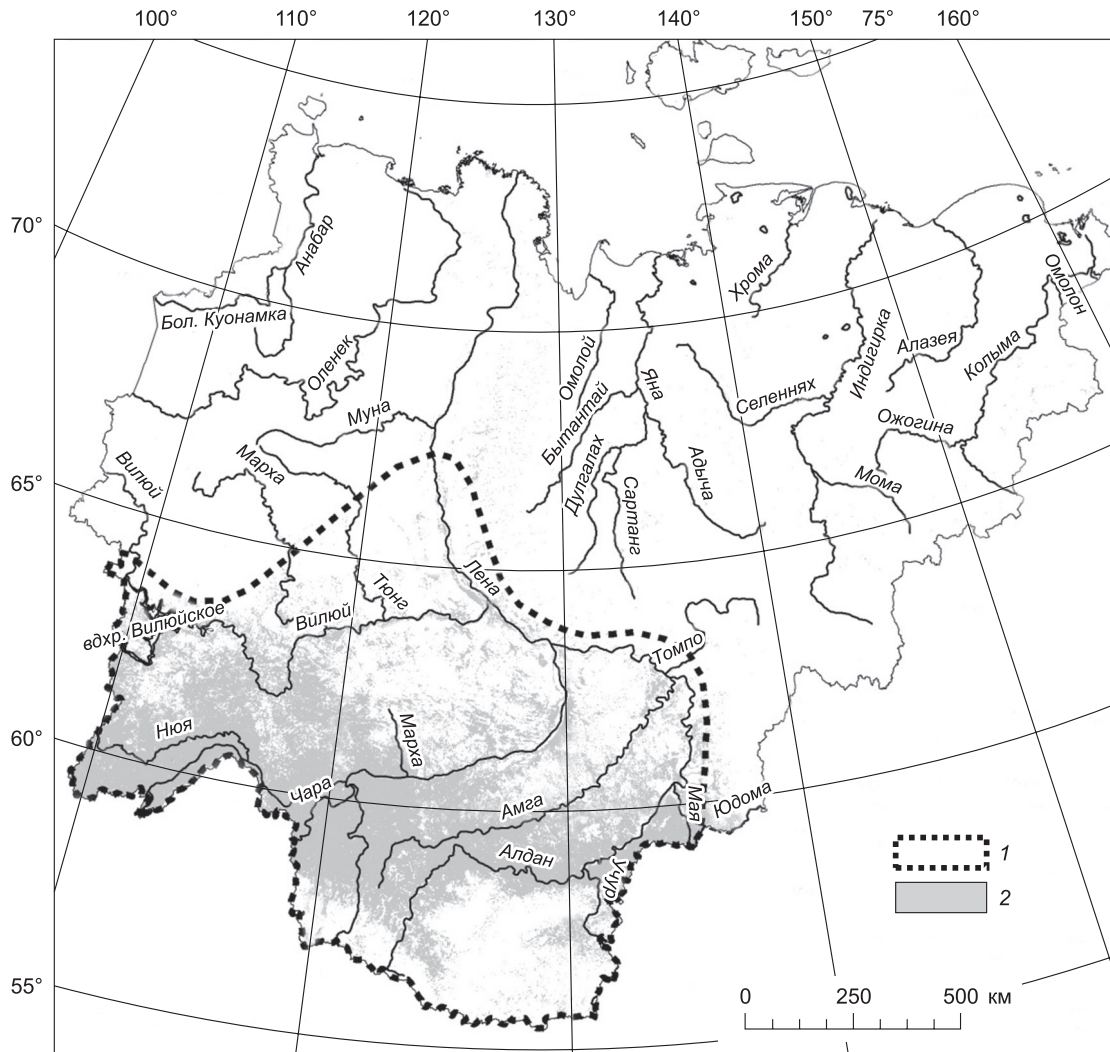


Рис. 2. Данные EVI за апрель 2016 г.:

1 – ареал сосны обыкновенной; 2 – ячейки раstra EVI, имеющие положительное значение (>0).

Fig. 2. EVI data for April 2016:

1 – area of Scots pine; 2 – cells of the EVI raster having a positive value (>0).

sylvestris – 10,2 млн га, или 6,5 % лесопокрытой площади Якутии. Остальные леса, сложенные *Picea obovata*, *Pinus sibirica*, *Abies sibirica*, занимают площадь менее 0,5 %. То есть в ранневесенний период положительное значение индекса EVI имеют в основном сосновые леса, где доминантом является *Pinus sylvestris*. Также необходимо отметить, что заросли кедрового стланика, широко распространенные в горах, на апрельских данных EVI практически не дешифрируются, это связано с тем, что в этот период они залегают под снежным покровом (рис. 2).

Если сравнить карты модели MaxEnt (см. рис. 1) и данные EVI (см. рис. 2), то сразу заметна схожесть этих данных. Для получения

статистически значимых результатов мы перевели эти данные в бинарный формат. Для модели MaxEnt данные вероятности находки мы переклассифицировали следующим образом: все значения менее 0,25 получили новое значение «0», значения модели выше 0,25 были классифицированы как «1». Данные EVI были переклассифицированы по следующей схеме: все отрицательные и нулевые значения были переведены в класс «0», все положительные значения – «1». В последующем эти новые бинарные растры мы сложили между собой и получили итоговый растр, где значение «2» имеют те ячейки растров, где модельные данные выше 0,25 и индекс EVI имеет положительное значение.

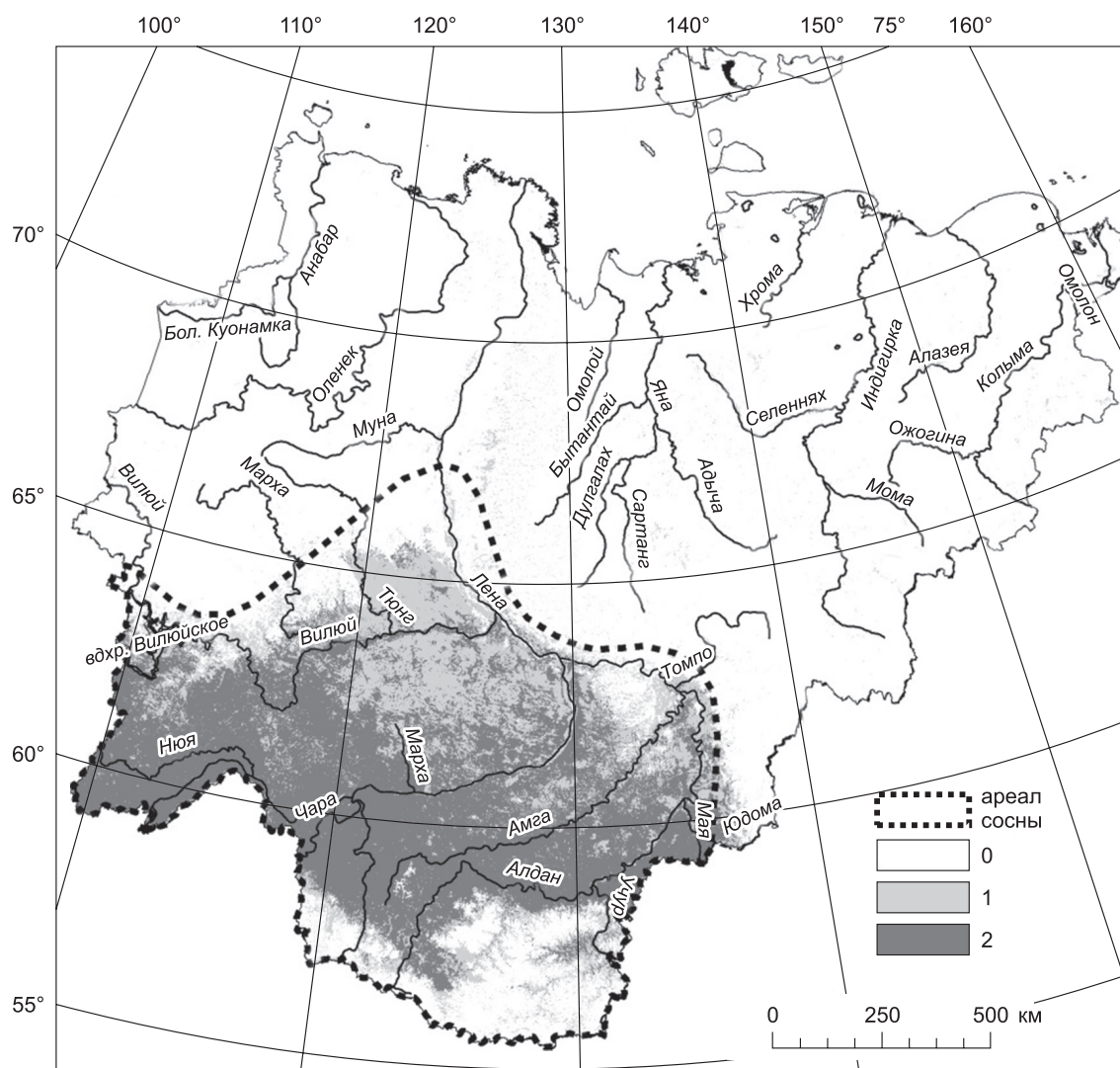


Рис. 3. Суммированный растр (в легенде указано числовое значение ячеек растра).

Fig. 3. Summarized raster (the legend indicates the numerical value of the raster cells).

ние, а значение «1» имеют те данные, где модельные данные имеют значения выше 0,25, но значения индекса EVI отрицательные или наблюдается обратная картина (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ выходных данных модели MaxEnt ареала *Pinus sylvestris* показал, что она отличается высокой производительностью потенциального распределения – индекс AUC = 0,896, что является очень высоким показателем [15, 17]. Тем самым можно утверждать, что созданная модель демонстрирует высокую степень совпадения с представлениями о распространении *Pinus sylvestris* на территории Якутии. Но в отличие от старых данных мы получили более точное кар-

тографическое отображение ареала. Уточнены южная и северная границы сосны. Площадь модельного ареала оценена в 63,8 млн га.

Кроме этого выделены два основных климатических параметра, формирующих этот ареал. К этим факторам относятся: среднегодовая температура (Bio 01), чей вклад в модель оценивается в 52,2 %, средняя температура самой влажной четверти года (Bio 08) – 34,5 %. Остальные переменные, чей вклад больше 1 % (Bio_10 – 4,4 %, Bio_05 – 2,6 %, Bio_06 – 1,3 %, Bio_15 – 1,1 %), имеют коэффициенты пермутации (%) выше значения вклада (см. таблицу). Этот факт говорит о том, что модель слабо реагирует на случайное изменение этих переменных. Таким образом, эти переменные не являются значимыми для произ-

растания *Pinus sylvestris*, слабо влияют на ее ареал, и ими можно пренебречь.

Анализ кривых (response curve) наиболее важных биоклиматических переменных Bio_01 и Bio_08 показывает нам пороговые значения, образующие экологическую нишу ареала сосны. Пороговые значения главных переменных выгля-

дят следующим образом (рис. 4). Прирост модели, при которой значения вероятности находок равны 0,25, у данных Bio_01 начинается с -125 (соответствует -12,5 °C), для значений Bio_08 пороговым является значение 130 (соответствует +13 °C). То есть исходя из модельных данных граница ареала сосны обыкновенной в

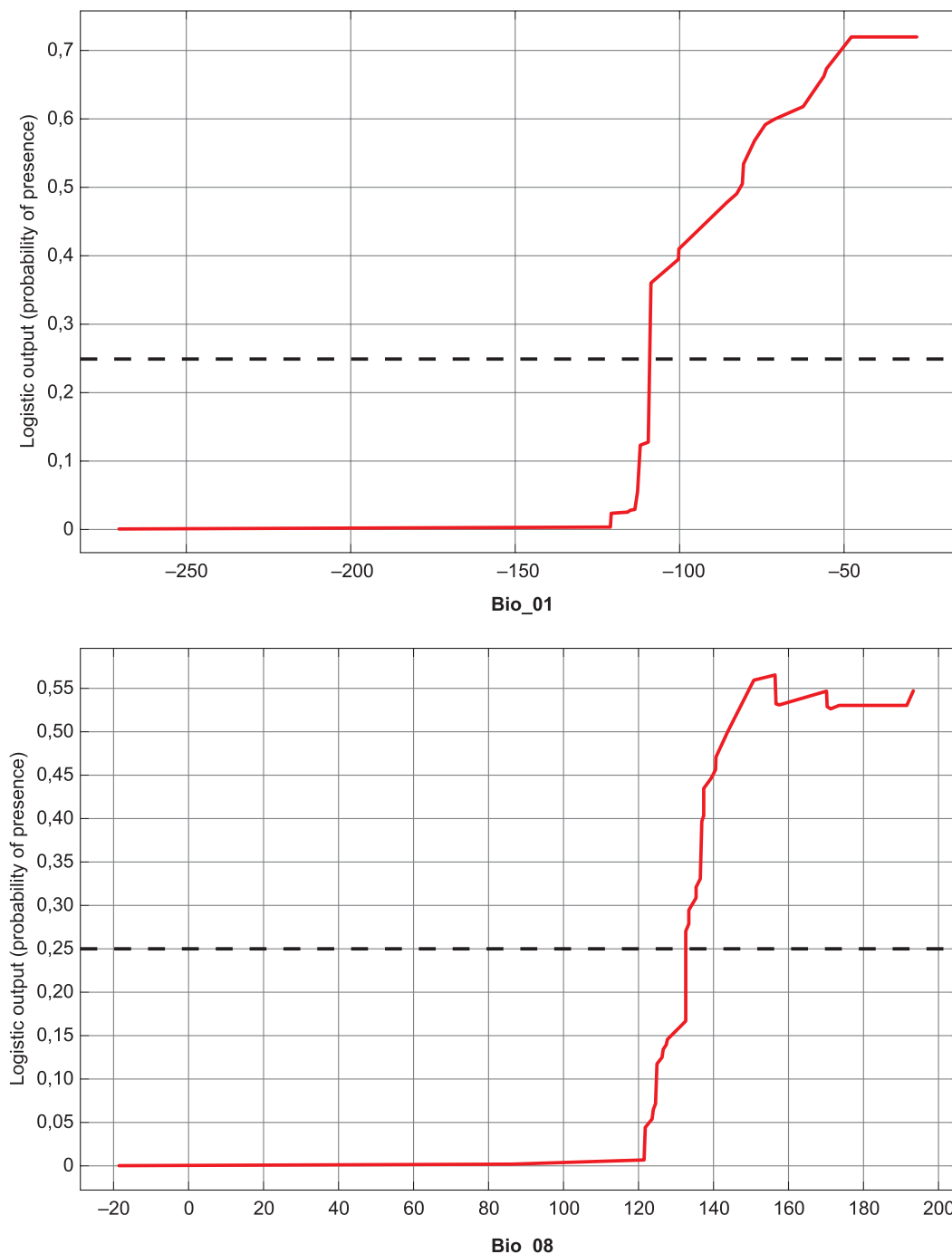


Рис. 4. Кривые зависимостей биоклиматических переменных в модели MaxEnt.

Fig. 4. Dependence curves of bioclimatic variables in the MaxEnt model.

Якутии ограничивается среднегодовой температурой $-12,5^{\circ}\text{C}$ и средними летними температурами $+13^{\circ}\text{C}$.

Верификация полученной модели с помощью вегетационного индекса EVI показала, что ячейки растра со значениями «2» занимают большую площадь 44,4 млн га, или 69,5 % от данных модели MaxEnt. Ячейки растра, имеющие значение «1», расположены в нижней части бассейна реки Вилюй. По всей видимости это можно объяснить двумя факторами: 1 – данная территория отличается крайне низкой сомкнутостью лесов, распространены перевеиваемые золотые пески (тукуланы); 2 – с начала XXI в. здесь было очень много лесных пожаров, от которых сильно пострадали сосновые леса (см. рис. 3).

Можно предположить, что чем выше модельные значения вероятности находок *Pinus sylvestris*, тем больше на данной площади деревьев данного вида и выше значения EVI с этой точки. Используя производные данные модели MaxEnt и EVI и создав точечный векторный слой из случайных точек (random points) ($n = 1000$), извлечены данные с растровых слоев модели MaxEnt и EVI. Полученные из атрибутивной таблицы данные сравнены между собой с помощью вычисления индекса корреляции методом Спирмена. Итоговые данные выглядят следующим образом: коэффициент корреляции данных EVI за апрель с данными модели MaxEnt составляет $r = 0,73$, что свидетельствует о высокой степени сопряженности показателей.

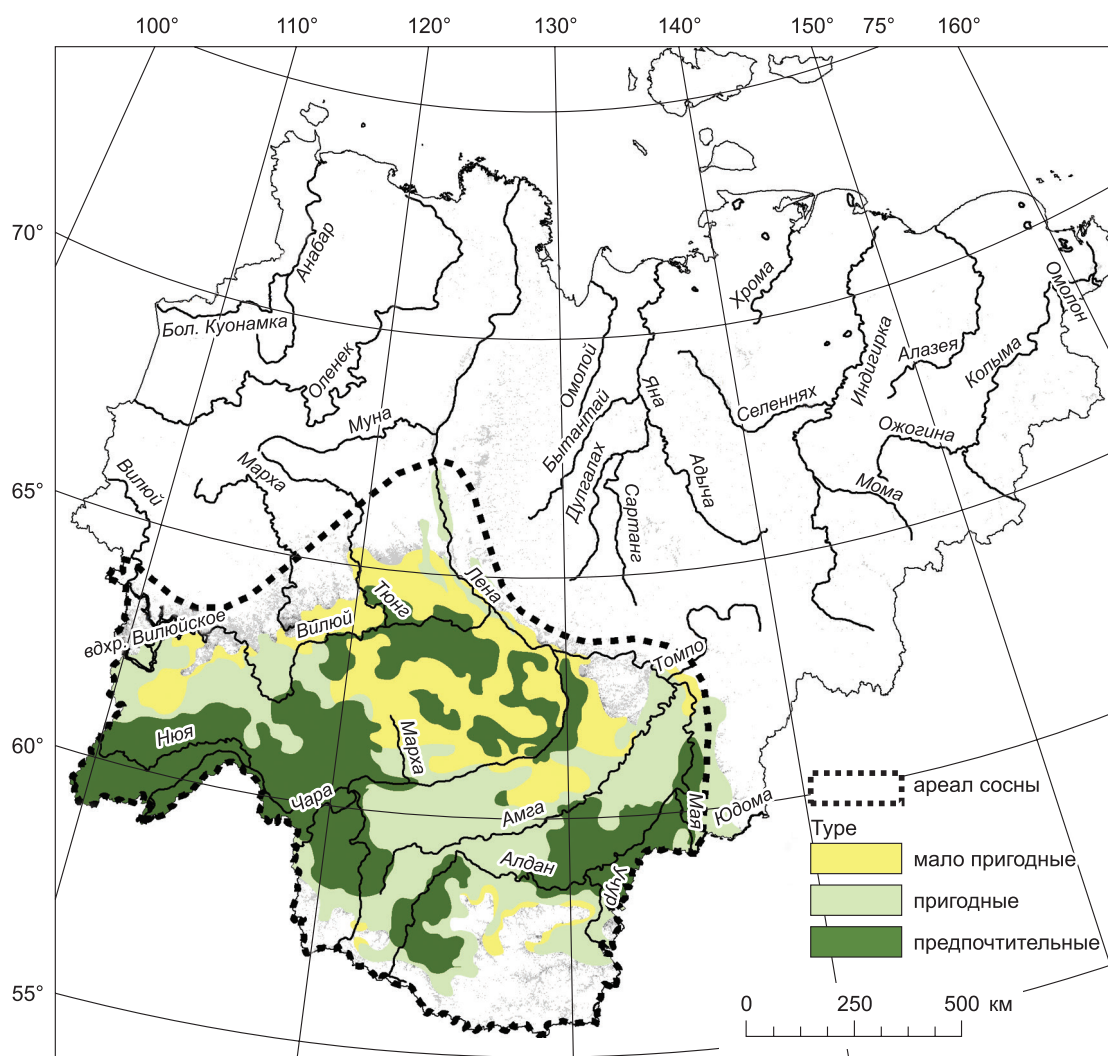


Рис. 5. Актуализированная карта ареала *Pinus sylvestris*.

Fig. 5. Updated map of the area of *Pinus sylvestris*.

На основе модельных данных и данных вегетационного индекса EVI создана новая карта ареала *Pinus sylvestris* в Якутии. На ней указаны не только границы ареала, но и ранжирование ареала по трем типам (рис. 5):

1) мало предпочтительные местопроизрастания – *Pinus sylvestris* произрастает на южных склонах в качестве редкой примеси в лиственных лесах;

2) средне предпочтительные местопроизрастания – *Pinus sylvestris* образует небольшие сосновые боры на вершинах склонов южной экспозиции, участвует в древостое во всех типах лиственных лесов сухих местопроизрастаний;

3) предпочтительные местопроизрастания – *Pinus sylvestris* образует большие массивы сосновых лесов на верхних частях возвышенностей, присутствует во всех древостоях, в том числе и в сырых условиях произрастания.

Полученные картографические и статистические данные наглядно показывают, что использование биоклиматических переменных при моделировании ареала *Pinus sylvestris* дает весьма хорошие результаты. Полученная модельная карта ареала не противоречит ранее опубликованным материалам, а фактически является их совершенствованием.

Разница в вычисленных данных о площадях, занятых сосной обыкновенной в Якутии (44,4 млн га), и официальных данных о площади сосновых лесов (10,2 млн га) не является противоречием, так как в первом случае учтена не только площадь сосновых лесов, но и площадь массивов других формаций, в составе древостоев которых участвует сосна. Данные модели свидетельствуют о том, что в пределах Якутии только четверть ареала *Pinus sylvestris* представлена сосновыми массивами, на остальной территории она произрастает в лиственных лесах в качестве примеси.

Выявленные пороговые климатические значения для ареала сосны (среднегодовая температура $-12,5^{\circ}\text{C}$ и средняя летняя температура $+13^{\circ}\text{C}$) хорошо согласуются в известными данными о распространении сосны в Якутии [31]. Эти данные подтверждают конфигурации внешних границ ареала *Pinus sylvestris*. Так, например, сосна не произрастает в низовьях р. Алдан и в то же время узкой полосой встречается вдоль р. Лена значительно севернее, доходя до широты п. Жиганск ($66^{\circ}46'$ с.ш.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные проведенного анализа могут послужить основой для создания новой карты ареала сосны обыкновенной на территории не только Якутии, но и всей Северной Евразии. Кроме того, модель позволяет понять, как изменятся породный состав лесов, лесистость Якутии при различных климатических сценариях. Так, согласно одному из сценариев изменения климата, к 2100 г. на территории Якутии прогнозируется увеличение лесопокрытой площади, смена лиственных лесов на другие хвойные породы и значительное смещение северной границы леса на север [32, 33]. Имея основные климатические характеристики и границы их значений, свойственных экологической нише *Pinus sylvestris*, можно создать прогнозные модели по изменению ареала вида в Якутии при различных климатических сценариях.

Литература

1. Шубин В.И., Гелес И.С., Крутов В.И. Повышение производительности культур сосны и ели на вырубках. Петрозаводск, 1991. 176 с.
2. Саковец В.И., Германова Н.И., Матюшкин В.А. Экологические аспекты гидромелиорации в Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 155 с.
3. Hellkvist J., Parsby J. The water relations of *Pinus sylvestris*. III. Diurnal and seasonal patterns of water potential // *Physiol. Plant.* 1976. V. 38. P. 61–68.
4. Соколов А.И. Лесовосстановление на Северо-Западе России. Петрозаводск, 2006. 215 с.
5. Сазонова Т.А., Болондинский В.К., Придача В.Б. Эколого-физиологическая характеристика сосны обыкновенной. Петрозаводск: Verso, 2011. 206 с.
6. Щепаченко Д.Г., Швиденко А.З., Лесив М.Ю. и др. Площадь лесов России и ее динамика на основе синтеза продуктов дистанционного зондирования // *Лесоведение*. 2015. № 3. С. 163–171.
7. Замолодчиков Д.Г. Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учетов лесного фонда // *Успехи современной биологии*, 2011. Т. 131, № 4. С. 382–392.
8. Тимофеев П.А., Исаев А.П., Щербаков И.П. и др. Леса среднетаежной подзоны Якутии. Якутск: Якутский научный центр СО РАН, 1994. 140 с.
9. Troeva E.I., Isaev A.P., Cherosov M.M. et al. The Far North: Plant Biodiversity and Ecology of Yakutia // *Plant and Vegetation*. V. 3. Springer, 2010. P. 165.
10. Elith J., Graham C.H., Anderson R.P. et al. Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data // *Ecography*. 2006. V. 29. P. 129–151.
11. Gibson L., Barrett B., Burbidge A. Dealing with uncertain absences in habitat modeling: a case study of a

rare ground-dwelling parrot // *Divers. Distrib.* 2007. V. 13(6). P. 704–713.

12. *Hernandez P.A., Franke I., Herzog S.K. et al.* Predicting species distributions in poorly-studied landscapes // *Biodivers. Conserv.* 2008. V. 17. P. 1353–1366.

13. *Franklin J.* Mapping species distribution; spatial inference and prediction. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 320 p.

14. *Ward G.* Statistics in ecological modeling; presence-only data and boosted mars. Palo Alto: Stanford University, 2007.

15. *Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E.* Maximum entropy modeling of species geographic distributions // *Ecol. Modeling.* 2006. V. 190. P. 231–259.

16. *Олонова М.В.* Использование гербарных коллекций для экологического моделирования // Материалы III межд. научно-практ. конф. «Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов» (7–9 октября 2015). Ч. 1. Минск. Беларусь, 2015. С. 446–449.

17. *Schelderman X., van Zonneveld M.* Training manual on spatial analysis of plant diversity and distribution. Rome: Biodiversity International, 2007. 180 p.

18. *Stohlgren K.S.* MaxEnt modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia // *Journal of Ecology and Natural Environment*, 2009. V. 1(4). P. 094–098.

19. *Khafaga O., Hatab E.E., Omar K.* Predicting the potential geographical distribution of *Nepeta septemcrenata* in Saint Katherine Protectorate, South Sinai, Egypt using MaxEnt // *Academia Arena*. 2011. V. 3(7). P. 45–50.

20. *Егошин А.В.* Моделирование пространственного распределения видов на территориях ООПТ Западного Кавказа с использованием геоинформационных систем // *Priroda.su* – 2012-1, <http://www.priroda.su/item/2981>

21. *Gaston K.J.* Species richness: measure and measurement. Biodiversity: a biology of numbers and difference / ed. K.J. Gaston. Oxford: Blackwell Science, 1996. P. 77–113.

22. *Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L. et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // *Int. J. Climatol.* 2005. V. 25. P. 1965–1978.

23. *Якутия* / под ред. И.С. Герасимова. М.: Наука, 1965. 464 с.

24. *Атлас лесов СССР*. М.: ГУГК, 1973. 222 с.

25. www.worldclim.org

26. *Guisan A., Graham C.H., Elith J., Huettmann F. and the NCEAS.* Species Distribution Modelling Group. Sensitivity of predictive species distribution models to change in grain size // *Divers. Distrib.* 2007. V. 13. P. 332–340.

27. *Pearson R.G., Raxworthy C.J., Nakamura M., Peterson A.T.* Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar // *J. Biogeo.* 2007. V. 34. P. 102–117.

28. *Murienne J., Guilbert E., Grandcolas P.* Species' diversity in the New Caledonian endemic genera *Cephalidiosus* and *Nobarnus* (Insecta: Heteroptera: Tingidae), an approach using phylogeny and species' distribution modelling // *Bot. J. Linn. Soc.* 2009. V. 97. P. 177–184.

29. *Phillips S.J., Dudik M. and Schapire R.E.* A maximum entropy approach to species distribution modeling // *Proceed. of the 21st Int. Conf. on Machine Learning*. New York: ACM Press, 2006. P. 655–662.

30. *Wiley E.O., McNyset K.M., Peterson A.T. et al.* Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm // *Oceanography*. 2003. V. 16. P. 120–127.

31. *Щербаков И.П.* Лесной покров Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1975. 344 с.

32. *Yu M., Wang G., Parr D., Ahmed K.F.* Future changes of the terrestrial ecosystem based on a dynamic vegetation model driven with RCP8.5 climate projections from 19 GCMs // *Climatic Change*. 2014. V. 127. P. 257–271.

33. *Замолодчиков Д.Г., Кобяков К.Н., Кокорин А.О. и др.* Лес и климат. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2015. 40 с.

References

1. *Shubin V.I., Geles I.S., Krutov V.I.* Povyshenie proizvoditel'nosti kul'tur sosny i eli na vyрубkah. Petrozavodsk, 1991. 176 p.

2. *Sakovec V.I., Germanova N.I., Matyushkin V.A.* Ekologicheskie aspekty gidromelioracii v Karelii. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2000. 155 p.

3. *Hellkvist J., Parsby J.* The water relations of *Pinus sylvestris*. III. Diurnal and seasonal patterns of water potential // *Physiol. Plant.* 1976. V. 38. P. 61–68.

4. *Sokolov A.I.* Lesovosstanovlenie na Severo-Zapade Rossii. Petrozavodsk, 2006. 215 p.

5. *Sazonova T.A., Bolondinskij V.K., Pridacha V.B.* Ekologo-fiziologicheskaya harakteristika sosny obyknovenoj. Petrozavodsk: Verso, 2011. 206 p.

6. *Schcepashchenko D.G., Shvidenko A.Z., Lesiv M.Yu. et al.* Ploshchad' lesov Rossii i ee dinamika na osnove sinteza produktov distancionnogo zondirovaniya // *Lesovedenie*. 2015. N 3. C. 163–171.

7. *Zamolodchikov D.G.* Ocenka klimatogennyh izmenenij raznoobraziya drevesnyh porod po dannym ucheta lesnogo fonda // *Uspekhi sovremennoj biologii*. 2011. V. 131. N 4. P. 382–392.

8. *Timofeev P.A., Isaev A.P., Schcerbakov I.P. et al.* Lesa srednetaezhnoj podzony Yakutii. Yakutsk: Yakutskij nauchnyj centr SO RAN, 1994. 140 p.

9. *Troeva E.I., Isaev A.P., Cherosov M.M. et al.* The Far North: Plant Biodiversity and Ecology of Yakutia // *Plant and Vegetation*. V. 3. Springer, 2010. P. 165.

10. *Elith J., Graham C.H., Anderson R.P. et al.* Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data // *Ecography*. 2006. V. 29. P. 129–151.

11. *Gibson L., Barrett B., Burbidge A.* Dealing with uncertain absences in habitat modeling: a case study of a

- rare ground-dwelling parrot // *Divers. Distrib.* 2007. V. 13(6). P. 704–713.
12. *Hernandez P.A., Franke I., Herzog S.K. et al.* Predicting species distributions in poorly-studied landscapes // *Biodivers. Conserv.* 2008. V. 17. P. 1353–1366.
13. *Franklin J.* Mapping species distribution; spatial inference and prediction. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 320 p.
14. *Ward G.* Statistics in ecological modeling; presence-only data and boosted mars. Palo Alto: Stanford University, 2007.
15. *Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E.* Maximum entropy modeling of species geographic distributions // *Ecol. Modeling.* 2006. V. 190. P. 231–259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
16. *Olonova M.V.* Ispol'zovanie gerbarnykh kolektsij dlya ekologicheskogo modelirovaniya // *Materialy III mezhd. nauchno-prakt. konferencii «Problemy sohraneniya biologicheskogo raznoobraziya i ispol'zovaniya biologicheskikh resursov» (7–9 oktyabrya 2015).* Ch. 1. Minsk. Belarus', 2015. P. 446–449.
17. *Schelderman X., van Zonneveld M.* Training manual on spatial analysis of plant diversity and distribution. Rome: Biodiversity International, 2007. 180 p.
18. *Stohlgren K.S.* MaxEnt modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia // *Journal of Ecology and Natural Environment*, 2009. – V. 1(4). P. 094–098.
19. *Khafaga O., Hatab E.E., Omar K.* Predicting the potential geographical distribution of *Nepeta septemcrenata* in Saint Katherine Protectorate, South Sinai, Egypt using MaxEnt // *Academia Arena*. 2011. V. 3(7). P. 45–50.
20. *Egoshin A.V.* Modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya vidov na territoriyah OOPT Zapadnogo Kavkaza s ispol'zovaniem geoinformatsionnykh sistem / *Priroda.su* 2012–1, <http://www.priroda.su/item/2981>
21. *Gaston K.J.* Species richness: measure and measurement. *Biodiversity: a biology of numbers and difference* / ed. K.J. Gaston. Oxford: Blackwell Science, 1996. P. 77–113.
22. *Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L. et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // *Int. J. Climatol.* 2005. V. 25. P. 1965–1978. DOI: 10.1002/joc.1276
23. *Yakutiya* / red. I.S. Gerasimova. M.: Nauka, 1965. 464 p.
24. *Atlas lesov SSSR.* M.: Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri Sovete ministrov SSSR, 1973. 222 p.
25. www.worldclim.org
26. *Guisan A., Graham C.H., Elith J., Huettmann F. and the NCEAS.* Species Distribution Modelling Group. Sensitivity of predictive species distribution models to change in grain size // *Divers. Distrib.* 2007. V. 13. P. 332–340.
27. *Pearson R.G., Raxworthy C.J., Nakamura M., Peterson A.T.* Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar // *J. Biogeo.* 2007. V. 34. P. 102–117.
28. *Murienne J., Guilbert E., Grandcolas P.* Species' diversity in the New Caledonian endemic genera *Cephalidiosus* and *Nobarnus* (Insecta: Heteroptera: Tingidae), an approach using phylogeny and species' distribution modelling // *Bot. J. Linn. Soc.* 2009. V. 97. P. 177–184.
29. *Phillips S.J., Dudik M. and Schapire R.E.* A maximum entropy approach to species distribution modeling // *Proceed. of the 21st Int. Conf. on Machine Learning.* New York: ACM Press, 2006. P. 655–662.
30. *Wiley E.O., McNyset K.M., Peterson A.T. et al.* Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm // *Oceanography*. 2003. V. 16. P. 120–127.
31. *Shcherbakov I.P.* Lesnoj pokrov Severo-Vostoka SSSR. Novosibirsk: Nauka, 1975. 344 p.
32. *Yu M., Wang G., Parr D., Ahmed K.F.* Future changes of the terrestrial ecosystem based on a dynamic vegetation model driven with RCP8.5 climate projections from 19 GCMs // *Climatic Change*. 2014. V. 127. P. 257–271.
33. *Zamolodchikov D.G., Kobyakov K.N., Kokorin A.O. et al.* Les i klimat. M.: Vsemirnyj fond dikoj prirody (WWF), 2015. 40 p.

Поступила в редакцию 12.06.2019
Принята к публикации 07.08.2019

About the authors

ISAEV Aleksandr Petrovich, doctor of biological sciences, principal researcher, Institute of Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia; Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinskogo Str., Yakutsk, 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-4488-0228>, alex_isaev@mail.ru;

BORISOV Boris Zakharovich, candidate of biological sciences, senior researcher, Institute of Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia, bzborisov@mail.ru;

NIKIFOROVA Evdokiya Nikolayevna, research engineer, Institute of Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia, gisnik@yandex.ru.

Citation

Isaev A.P., Borisov B.Z., Nikiforova E.N. Bioclimatic modeling of the distribution of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) in Yakutia // Arctic and Subarctic natural resources. 2019; V. 24, N 3, pp. 121–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-11>

Об авторах

ИСАЕВ Александр Петрович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Россия, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 41, Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, Россия, г. Якутск, Белинского, 58,

<https://orcid.org/0000-0002-4488-0228>, alex_isaev@mail.ru;

БОРИСОВ Борис Захарович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Россия, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 41, bzborisov@mail.ru;

НИКИФОРОВА Евдокия Николаевна, инженер-исследователь, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Россия, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 41, gisnik@yandex.ru.

Информация для цитирования

Исаев А.П., Борисов Б.З., Никифорова Е.Н. Биоклиматическое моделирование ареала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24, № 3. С. 121–133. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-11>