

ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ПРИРОДЫ

УДК 582.923.5:58.032

DOI: 10.36305/2712-7788-2022-4-165-27-39

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОДНОГО РЕЖИМА *PINUS NIGRA* SUBSP. *PALLASIANA* ПРИ ПОМОЩИ ЭКОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В УСЛОВИЯХ ЮБК

Олег Антонович Ильницкий, Андрей Владимирович Паштецкий

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН,
298648, Республика Крым, г. Ялта, пгт Никита, Никитский спуск, 52
E-mail: ilnitsky.oleg@mail.ru

Для изучения экофизиологической реакции *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* на воздействие факторов внешней среды в период вегетации, мы применили математическую модель пошагового регрессионного анализа. В качестве зависимых переменных использовали относительную скорость сокодвижения в побеге (Sf, от. ед.) – датчик сокодвижения SF-5P и диаметр побега (d, мм.) – датчик SD-10z. Независимыми переменными являлись основные факторы внешней среды. Доля дисперсии зависимой переменной, объясняемой применяемыми моделями, составляет 97%. Практический выход разработанной модели с соответствующими количественными характеристиками заключается в том, что в перспективе можно будет прогнозировать экологическое состояние определенного региона.

Ключевые слова: *Pinus nigra* subsp. *pallasiana*; математическая модель; водный режим; прогноз; оптимальные и предельные условия окружающей среды

Введение

Особенности климата Южного берега Крыма (ЮБК), являющимся регионом сухих субтропиков, позволяют сохранять естественную растительность, закладывать новые и реконструировать существующие зеленые насаждения, которые находятся в условиях микроклимата, формируемого окружающей средой (Анненков, 1984; Плугатарь и др., 2015).

Будущие климатические сценарии предсказывают, что Средиземноморский регион будет среди наиболее пострадавших частей мира с точки зрения увеличения частоты и интенсивности засух (Gauthier *et al.*, 2017). В раннем прошлом в Средиземноморском регионе уже наблюдалось повышение среднегодовой температуры и усиление летних засух, которые влияют на жизнеспособность и продуктивность лесов (Giorgi *et al.*, 2008). Изучение характера роста и реакции деревьев на условия окружающей среды может помочь предсказать, каким образом виды деревьев и леса могут реагировать на повышение температуры и нехватку воды.

При подборе таких видов растений необходимо изучение различных процессов жизнедеятельности в условиях их произрастания. В парках, лесопарках, хвойных лесах ЮБК лесообразующим видом является сосна Палласа или сосна крымская (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana*), которую некоторые авторы считают подвидом сосны черной. Для изучения экофизиологической реакции на воздействие факторов внешней среды в условиях ЮБК проведены эти исследования.

Известно мало работ по реакции изучаемого вида на сезонные изменения климата в условиях Крыма и юга Украины (Ivan *et al.*, 2004; Korshikov *et al.*, 2011) и толерантности их к летней засухе, а также у растений, произрастающих в Средиземноморском регионе сухих субтропиков (Gauthier *et al.*, 2017). Проведены полевые исследования на сосне черной *Pinus nigra* subsp. *laricio* по реакции ее на летнюю засуху (университет Корсики -

Франция) в естественном горном сосновом лесу (Gauthier *et al.*, 2017). Наблюдается снижение газообмена и ксилемного потока, которое регулируется устьичной проводимостью. В то же время, увеличивается эффективность использования воды и снижение ограничения проводимости мезофилла. Такая реакция на летнюю засуху показывает возможности *Pinus nigra* subsp. *laricio* пройти физиологическую адаптацию к изменению климата. В бассейне Средиземного моря, количество осадков, как ожидается, снизится на более чем на 25–30 % к концу 21-го века, вероятно, сопровождаясь повышением на 4–5°C среднегодовых температур (Giorgi, Lionello, 2008).

Кроме того, эти результаты служат важной основой для дальнейшего понимания экофизиологических ответов на изменяющиеся факторы окружающей среды.

Особенности водного режима сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях средиземноморского горного климата изучались в «Институте наук о Земле 'Jaume Almera'» (Испания, Барселона). Для изучения реакции водного режима данного вида на почвенную и атмосферную засуху использовали ряд параметров: водный потенциал листьев, относительную скорость ксилемного потока, гидравлическую проводимость, газообмен листьев, устьичную проводимость. Результаты исследований позволили изучить реакцию этих параметров на воздействие экстремальных факторов внешней среды во время летней засухи и определить устойчивость вида (Poyatos *et al.*, 2008).

Исследования по изучению потоков углерода от листовой поверхности до ландшафтного уровня в условиях засухи (Sperlich *et al.*, 2015) проводились в парке Коллсерола, (Барселона, Испания) на различных видах, в том числе и на сосне аллепской (*Pinus halepensis* Mill.). Изучали зависимость сезонной акклиматизации фотосинтеза и морфологии в освещенных солнцем и затененных листьях в естественных условиях. Сильная засуха индуцировала раннее старение листьев и при этом значительно увеличилась масса листа на единицу площади. Затемненные листья (хвоя) имели более низкие фотосинтезирующие потенциалы и не смогли смягчить негативные последствия в периоды стресса. Проведенные исследования объясняют реакцию растительности на абиотические стрессы и обладают большим потенциалом для снижения неопределенности в наземных биосферных моделях, особенно в условиях засухи.

Для разработки научных основ выращивания саженцев и изучения влияния интенсивности светового излучения на фотосинтетические характеристики и эффективность водопользования *Pinus tabulaeformis* (родина – бассейн Средиземного моря, Китай) была проведена серия опытов в полужасушливой области на опытной станции Пекинского лесотехнического университета (Zhang *et al.*, 2007).

Результаты исследований показали, что интенсивность видимого фотосинтеза и транспирации при возрастании освещенности увеличивались, однако из-за нехватки воды в почве, устьичная проводимость уменьшается и может создать защитный механизм для предотвращения большего потребления воды и газообмена листьев.

Показано, что саженцы *Pinus tabulaeformis* особенно страдают от сильного света, приводящего к сдерживанию роста. Полученные результаты исследований позволили разработать научные основы выращивания саженцев для регионов с экстремальными факторами внешней среды.

Целью работы было исследование экофизиологической реакции *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* на воздействие факторов внешней среды в период активной вегетации, влияющих на особенности водного режима, позволяющих определить оптимальные и ограничивающие условия произрастания вида в условиях ЮБК.

Методология исследований

Сосна крымская (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana*) Средиземноморский горный, доминирующий вид. Ареал растения включает Крым, главным образом южный склон

Яйлы, и Кавказ по склонам гор к югу от Геленджика. В древности крымская сосна покрывала чуть ли не все склоны и отроги гор Крыма до морского берега. Дерево высотой 20–30 (до 45 м). Крона широкая, пирамидальная, у более старых деревьев плоская, зонтикообразная. Ветви горизонтальные, с загнутыми вверх побегами. Кора чёрная или тёмно-бурая, трещиноватая, глубоко-бороздчатая, в верхней части ствола красноватая. Молодые побеги жёлто-бурые, блестящие. Почки крупные с прямыми, не отогнутыми чешуями. Хвоя тёмно-зелёная, очень плотная и колючая, несколько изогнутая, длиной 8–12 см, шириной 1,6–2,1 мм. Цветёт сосна крымская в начале мая. Шишки крупные, с коричневыми лоснящимися щитками и красным, слегка выпуклым пупком. Семена темно-серые, крапчатые, матовые, крупнее, чем у сосны обыкновенной. Шишки созревают в августе–сентябре. В ареале, в основном произрастает на каменистых почвах, содержащих известь. Хорошо растет на суглинистых и глинисто-известняковых почвах. Может хорошо расти на сухих и очень бедных почвах, чистых известняках и почвах с малым содержанием зольных элементов. Сосна крымская очень светолюбива и относительно влаголюбива. Хорошо развивается как в нижнем, так и среднегорном и верхнем лесном поясе на высотах 500–900 м н.у.м. На этих высотах, особенно выше 700 м, в условиях, с повышенной влажностью и более частыми осадками в виде дождя и снега, крымская сосна имеет наиболее интенсивный прирост и формирует сомкнутые древостои высокого бонитета. Очень хорошо возобновляется самосевом на открытых местах, особенно после пожаров и на вырубках.

Исследования проводились в условиях вегетационного опыта на территории центрального отделения Никитского ботанического сада. Растения – саженцы 3–4 лет, выращенные из черенков. Время проведения опытов июнь – сентябрь 2019–2020 гг.

Для измерения характеристик внешней среды использовали беспроводную систему фитомониторинга, которая включает Фитомонитор РМ-11z компании “Bioinstruments S.R.L.”, USB адаптер и набор беспроводных датчиков: метеостанция DWS-11z – измерительный комплекс, объединяющий пиранометр (Apogee Instruments, США), датчик температуры и влажности воздуха, дождемер (Decagon Devices, США) и анемометр (Davis Instruments (США)). Изменения диаметра ствола (побега) – датчиками FI-Sz, SD-10z подключенным в беспроводную систему Фитомонитора РМ-11z. Относительную скорость сокодвижения в побеге (Sf, от. ед.) – датчик сокодвижения SF-5P (Ильницкий и др., 2018).

Статистическую обработку данных выполняли с использованием прикладных компьютерных программ Statistica 10 (“Statsoft Inc.”, США) и Microsoft Excel 2010. Для моделирования и сглаживания двумерных данных использованы методы наименьших квадратов, а также математической модели пошагового регрессионного анализа. (Statistica 10). Все расчеты осуществляли при заданном уровне значимости $P \leq 0,05$.

Результаты исследований

Проведенная серия опытов в тепличных условиях на протяжении периода вегетации позволила получить информацию об ответных реакциях данного вида на воздействие абиотических факторов. Фитомониторинг позволяет с помощью современных информационно-измерительных систем осуществить комплексную оценку состояния и функций растения, которая находится под влиянием антропогенных или природных факторов среды.

Эколого-физиологическая характеристика растений, выраженная в форме математической модели, позволяет определять потенциальный уровень процесса, условия его проявления, границы оптимума, возможности компенсации лимитирующих факторов и другие показатели, характеризующие потребности и пластичность организма (Дроздов, 1995; Дроздов, 2003; Larcher, 2003; Kint *et al.*, 2014).

Применение специальных алгоритмов обработки информации позволяет диагностировать физиологическое состояние и свойства генотипа. Результаты этих исследований дают возможность получать данные об интенсивности водного обмена, засухоустойчивости, теневыносливости, особенностях роста и развития растений.

Интенсивность транспирации и устьичная проводимость наиболее полно характеризуют особенности водного режима растения.

В наших исследованиях синхронно с регистрацией параметров внешней среды (независимые переменные), регистрировалась ряд зависимых переменных в том числе и скорость ксилемного потока в побеге и изменение диаметра этого побега. Установлено, что коэффициент корреляции между интенсивностью транспирации (E) и скоростью ксилемного потока (S_f) равнялся 0,784562, а между интенсивностью транспирации и устьичной проводимостью g_s – 0,638624.

Учитывая, что измерения относительной скорости водного потока и диаметра побега объединяют показатели доступной для растения влаги в почве и параметры внешней среды, они могут быть использованы как ирригационный индикатор отклика (реакции) вида на водоснабжение (Ильницкий и др., 2018).

Эколого-физиологическая характеристика растений, выраженная в форме математической модели регрессионного анализа, была построена при помощи пошагового регрессионного анализа. В модель включались коэффициенты с уровнем значимости p -критерия Стьюдента, не превышающего 0,05.

В качестве зависимых переменных были взяты скорость ксилемного потока в побеге растения (S_f , от.ед.), и изменение диаметра этого побега (d , мм), а независимыми переменными являлись: ΦAP (I) – фотосинтетически активная радиация, мкмоль/м²с; T_v – температура воздуха, °C; T_p – температура точки росы, °C; H – влажность воздуха, %; VPD – дефицит влажности воздуха, кПа. Число наблюдений (длина ряда) составляла 7546. Зависимая переменная рассчитывалась по формуле:

$$v_{13} = b_0 + b_1 \cdot v_3 - b_2 \cdot v_4 + b_3 \cdot v_5 + b_4 \cdot v_6 + b_5 \cdot v_7$$

Индексом v обозначались номера зависимой и независимой переменных. Зависимая переменная рассчитывалась по формуле:

$$S_f = 4,8003 + 1,0404 \cdot VPD - 0,0367 \cdot H\% + 0,3316 \cdot T_v + 0,2658 \cdot T_p^{\circ C} + 0,0001 \cdot I$$

Точность аппроксимации выбранной модели основана на трех показателях эффективности (табл. 1–3) – коэффициента детерминации (R^2), корня из среднеквадратичной ошибки (RMSE) и суммы квадратов ошибок (SSE). Как видно из таблиц, в уравнениях достаточно высокие коэффициенты детерминации и небольшие RMSE и SSE, уровень значимости критерия Стьюдента не превышает 0,05.

Таблица 1

Итоговые статистики

Table 1

Final statistics

Итоговые статистики; ЗП:Пер13 (Таблица данных)	
	Значение / Value
Множест. R	0,98897318
Множест. R ²	0,97806796
Скоррект. R ²	0,97805343
F(5,7546)	67303,3965
p	0
Стд. Ош. Оценки	0,172819842

Итоги регрессии для зависимой переменной

Таблица 2

Table 2

Regression results for the dependent variable

Итоги регрессии для зависимой переменной: Пер13 (Таблица данных) R= 0,98897318 R2= 0,97806796 Скоррект. R2= 0,97805344 F (5,7546) = 67303, p=0000 Стандартная ошибка оценки: 0,17282						
N=7546	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t (7546)	p-знач.
Св. член			4,800379	0,067771	70,832	0,00
Пер3	1,33131	0,002436	1,040470	0,001904	546,427	0,00
Пер4	-0,51091	0,010630	-0,036700	0,000764	-48,062	0,00
Пер5	-1,44707	0,011818	0,331681	0,002709	-122,448	0,00
Пер6	0,86945	0,009226	0,265812	0,002821	94,234	0,00
Пер7	-0,06991	0,002672	0,000188	0,000007	-26,164	0,00

Коэффициенты (b0 – b6) при независимых переменных в уравнении

Таблица 3

Table 3

Coefficients (b0 – b6) for independent variables in the equation

Модель: $v_{24} = -b_0 + b_1 \cdot v_{32} + b_2 \cdot v_{33} - b_3 \cdot V_{39} + b_4 \cdot V_{42} + b_5 \cdot v_{46}$ (Таблица данных) Зав. пер.: Пер13 Потери: (OBS-PRED)**2 Итоговые потери: 7747,0010474 R= 0,98897318 Объяснён. дисперс.: 97						
N=7546	b0	b1	b2	b3	b4	b5
Оценка / Value	4,800379	1,040470	-0,036700	0,331681	0,265812	0,000188

Точность модели – разность между экспериментальными данными и рассчитанными по модели (рис. 1).

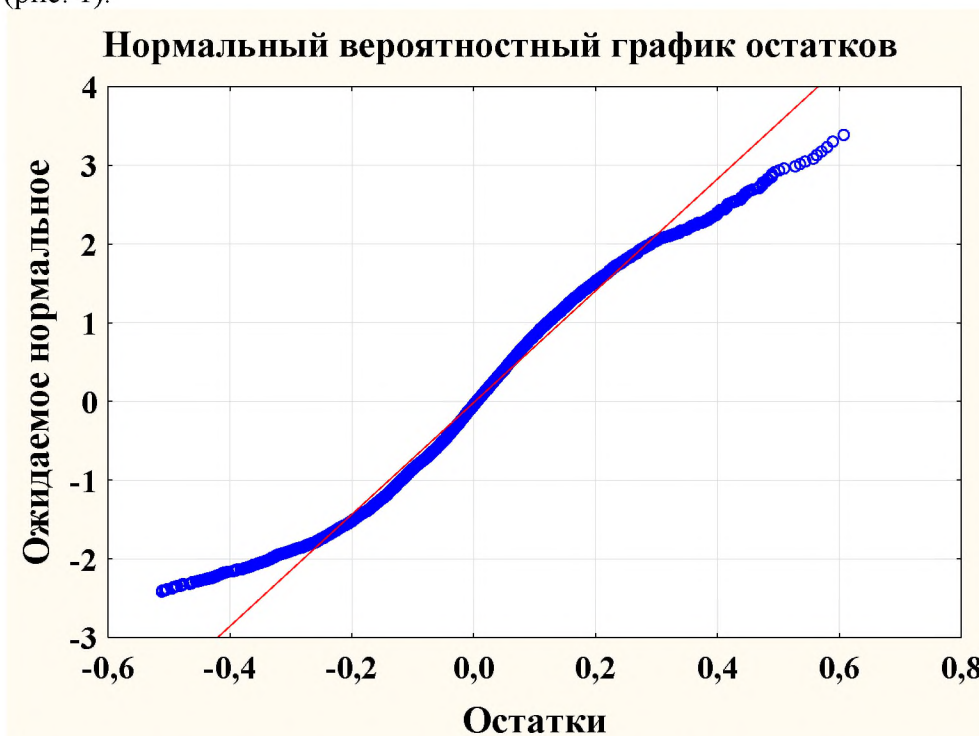


Рис. 1 Зависимость между нормальным вероятностным графиком остатков и ожидаемым нормальным

Fig. 1 The relationship between the normal probability plot of residuals and the expected normal

На рисунке 2 показана зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением.

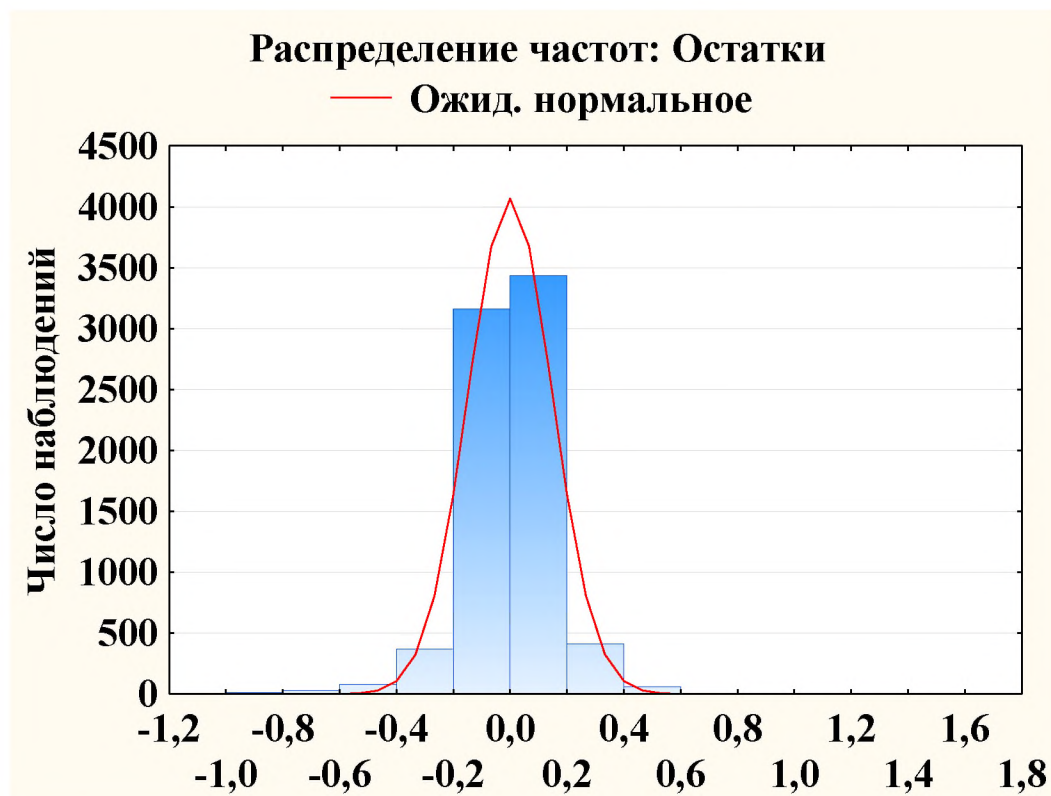


Рис. 2 Зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением
Fig. 2 Relationship between the number of observations and the expected normal distribution

На рисунке 3 представлена диаграмма размаха независимых переменных в уравнении.

Доля дисперсии зависимой переменной, объясняемой применяемой моделью составляет 97 %. Модель вполне удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Ниже приведено уравнение множественной регрессии где в качестве зависимой переменной было изменение диаметра этого побега (d , мм), а независимыми переменными являлись – ФАР (I): фотосинтетически активная радиация, $\text{мкмоль/м}^2\text{с}$; $T_{\text{в}}$ – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{р}}$ – температура точки росы, $^{\circ}\text{C}$; H – влажность воздуха, %; VPD – дефицит влажности воздуха, кПа. Уравнение множественной регрессии имеет вид:

Модель: $v_{10} = b_0 - b_1 \cdot v_3 + b_2 \cdot v_4 - b_3 \cdot v_5 + b_4 \cdot v_6 - b_5 \cdot v_7$

$d = 5,9278 - 1,0432 \cdot \text{VPD} + 0,0286 \cdot H\% - 0,3239 \cdot T_{\text{в}} + 0,2441 \cdot T_{\text{р}}^{\circ}\text{C} - 0,00007 \cdot I$

Число наблюдений (длина ряда) составляло 7546.

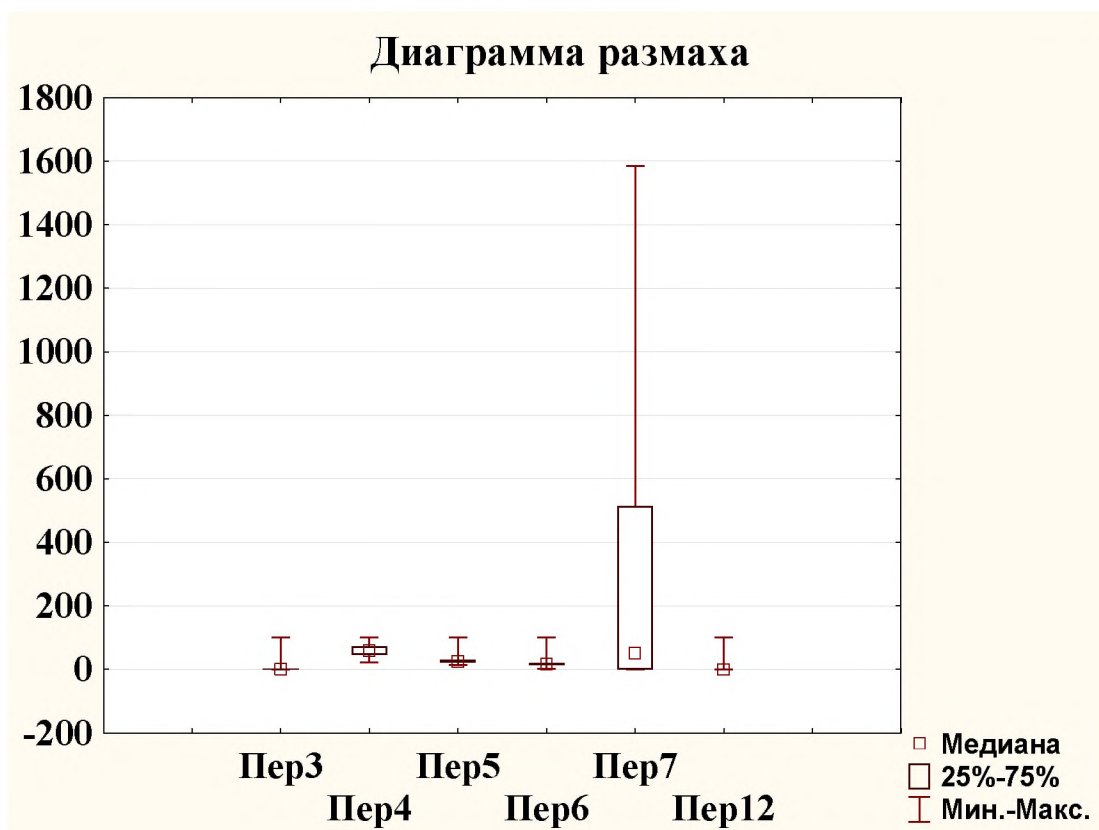


Рис. 3 Диаграмма размаха независимых переменных в уравнении
 Fig. 3 Diagram of the range of the independent variables in the equation

Точность аппроксимации выбранной модели основана на трех показателях эффективности (табл. 4–6) – коэффициента детерминации (R^2), корня из среднеквадратичной ошибки (RMSE) и суммы квадратов ошибок (SSE).

Как видно из таблиц, в уравнениях небольшие RMSE и SSE и уровень значимости критерия Стьюдента не превышает 0,05.

Точность модели – разность между экспериментальными данными и рассчитанными по модели (рис. 4).

Таблица 4

Итоговые статистики

Table 4

Final statistics	
Итоговые статистики; ЗП:Пер10 (Таблица данных)	
	Значение / Value
Множест. R	0,98949213
Множест. R2	0,97909468
Скоррект. R2	0,97908083
F(5,7546)	70692,3286
p	0
Стд. Ош. Оценки	0,237262

Таблица 5

Итоги регрессии для зависимой переменной

Table 5

Regression results for the dependent variable

Итоги регрессии для зависимой переменной: Пер10 (Таблица данных) R= 0,98949213 R2= 0,97909468 Скоррект. R2= 0,9790468 F(5,7547)=70692, p=0000 Стандартная ошибка оценки: 0,23726						
N=7547	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t(7547)	p-знач.
Св.член			5,927866	0,092777	63,8936	0,000000
Пер3	1,20089	0,002232	-1,043279	0,001939	537,9503	0,000000
Пер4	-0,28362	0,010371	0,028638	0,001047	-27,3462	0,000000
Пер5	-1,01998	0,011596	-0,323969	0,003683	-87,9606	0,000000
Пер6	0,58639	0,009254	0,244143	0,003853	63,3688	0,000000
Пер7	-0,01925	0,002608	-0,000073	0,000010	-7,3797	0,000000

Таблица 6

Коэффициенты (b0 – b6) при независимых переменных в уравнении

Table 6

Coefficients (b0 – b6) for independent variables in the equation

Модель: $v_{10}=b_0+b_1*v_3-b_2*v_4-b_3*v_5+b_4*v_6-b_5*v_7$ (Таблица данных) Зав. пер.: Пер10 Потери: (OBS-PRED)**2 Итоговые потери: 424,84520933 R= ,98949 Объяснён. дисперс.: 97						
7547	b0	b1	b2	b3	b4	b5
Оценка / Value	5,927866	-1,043279	0,028638	-0,323969	0,244143	-0,000073

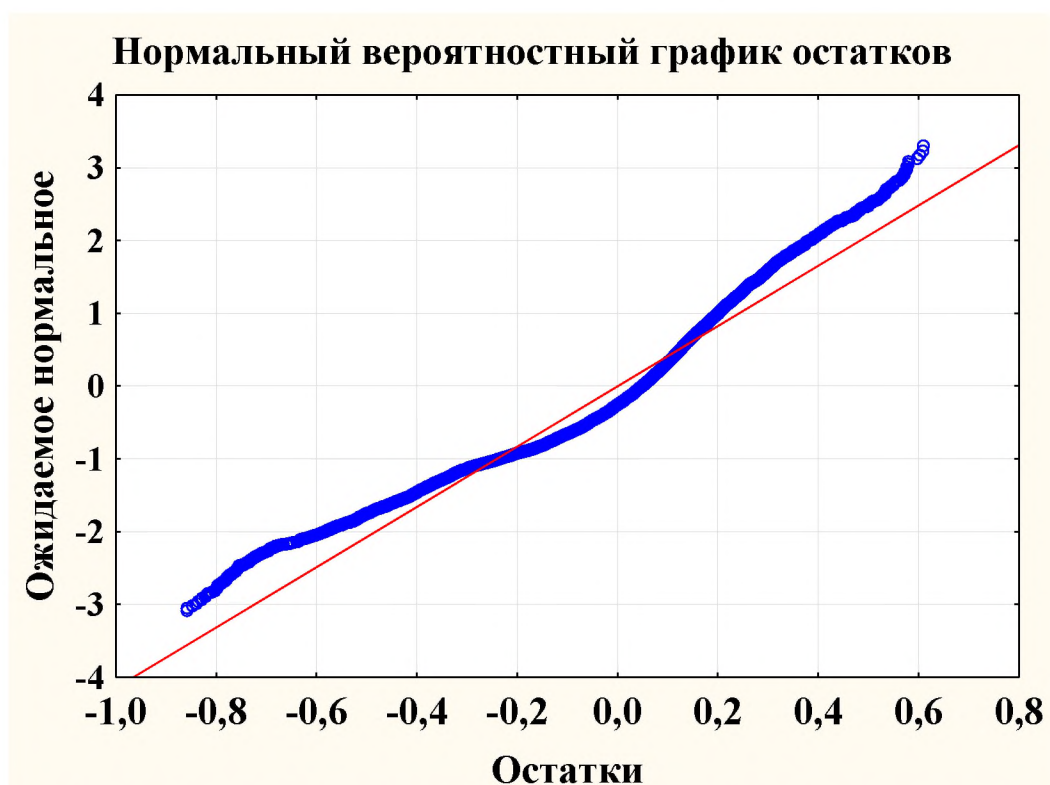


Рис. 4 Зависимость между нормальным вероятностным графиком остатков и ожидаемым нормальным

Fig. 4 The relationship between the normal probability plot of residuals and the expected normal

На рисунке 5 показана зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением.

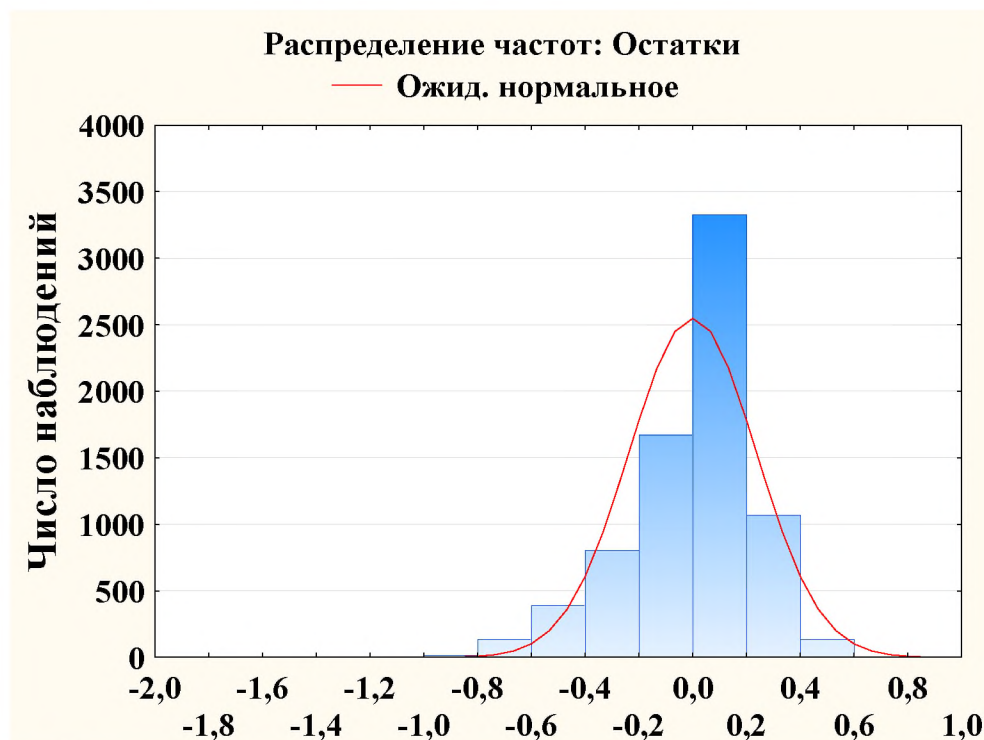


Рис. 5 Зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением
Fig. 5 Relationship between the number of observations and the expected normal distribution

На рисунке 6 представлена диаграмма размаха независимых переменных в уравнении.

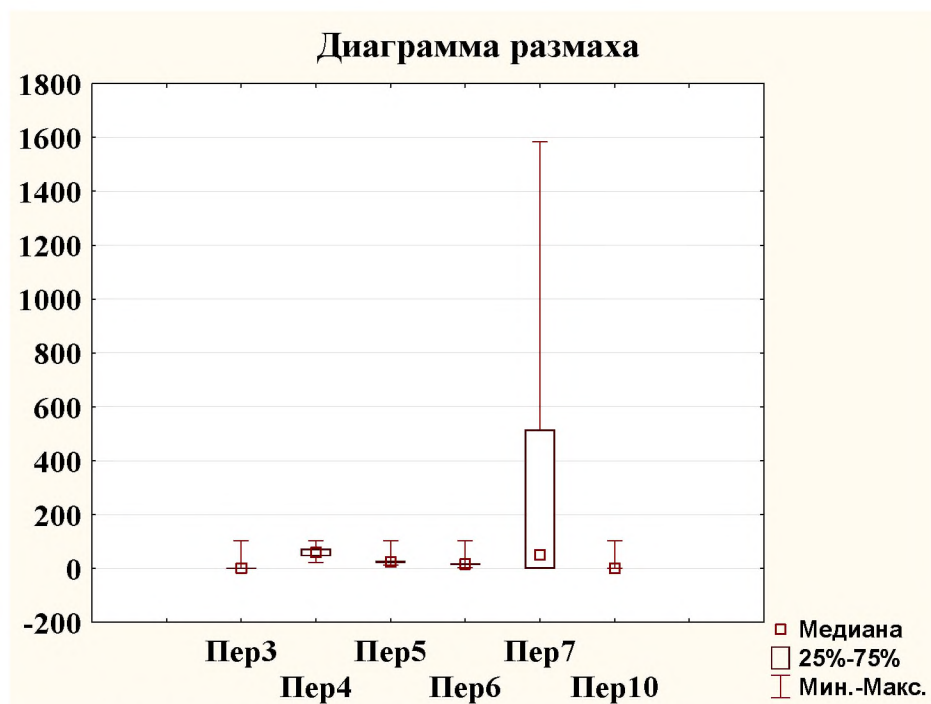


Рис. 6 Диаграмма размаха независимых переменных в уравнении

Fig. 6 Diagram of the range of the independent variables in the equation

Доля дисперсии зависимых переменных разработанных моделей составляет 97% и модель вполне удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Для моделей множественной регрессии (таблица 7) были рассчитаны коэффициенты корреляции между независимыми переменными (3-7) и зависимыми (Sf, dp).

Таблица 7

Коэффициенты корреляции между независимыми переменными (3–7) и зависимыми (Sf, d)
Table 7
Correlation coefficients between independent variables (3-7) and dependent variables (Sf, d)

Независимые переменные Independent variables	Пер3	Пер4	Пер5	Пер6	Пер7
Зависимые переменные (Sf, d) Dependent variables (Sf, d)	ДДВП (кПа)	Относительная влажность воздуха (Н,%)	Температура воздуха (°C)	Точка росы (°C)	ФАР (мкмоль/м ² ·с)
Sf, отн. ед.	0,71677	-0,413029	0,758146	0,370093	0,690338
d, мм	-0,34924	0,33008	-0,41804	-0,126571	-0,2075

Из таблицы видно, что скорость ксилемного потока в побеге растения (Sf, от.ед.) имеет более тесные корреляционные связи с факторами внешней среды – освещенностью (ФАР), температурой воздуха (Тв), и дефицитом влажности воздуха (ДДВП) чем изменение диаметра побега. Диаметр побега (dp, мм) имеет положительную корреляционную связь с относительной влажностью воздуха (0.33008), с остальными факторами внешней среды эта связь отрицательна.

Доля дисперсии зависимых переменных, объясняемой применяемыми моделями, составляет 97 %.

До настоящего времени нет разработанной теоретической и материальной основы для сбора и анализа информации о физиологическом состоянии растительности. Проводятся периодические обследования растений на выбранных территориях с тем, чтобы можно было оценить эволюцию состояния растений и составлять прогнозы его развития с учетом изменения состояния окружающей среды в данном регионе (Генкель, 1982; Nevzat *et al.*, 2014.; Meletiou-Christou, 2017).

Эколого-физиологические характеристики растений, выраженные в форме математической модели зависимости биологических процессов от условий среды, позволяет определять потенциальный уровень процесса, условия его проявления, границы оптимума, возможности компенсации лимитирующих факторов и другие показатели, характеризующие потребности и пластичность организма (Aylin *et al.*, 2020.; Mohamed *et al.*, 2020). Информация позволяет диагностировать физиологическое состояние и свойства генотипа. Результаты этих исследований дают возможность получать данные об интенсивности водного обмена, засухоустойчивости, теневыносливости, особенностях роста и развития растений (Jones *et al.*, 2003).

Функции приборной базы фитомониторинга – это непрерывный мониторинг как характеристик растения, так и параметров среды, системный анализ данных и их изменений во времени.

Выводы

Изучение экофизиологической реакции *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* на воздействие факторов внешней среды в период вегетации, влияющих на особенности водного режима, позволило определить ряд параметров, позволяющих построить математические модели этих зависимостей: зависимыми переменными являлись скорость ксилемного потока (Sf) в побеге растения и изменение диаметра этого побега (dп), а независимыми переменными являлись основные факторы внешней среды.

Эколого-физиологическая характеристика растений, выраженная в форме математической модели регрессионного анализа, была построена при помощи пошагового регрессионного анализа, где качестве зависимых переменных мы использовали

Выбранная модель на основана на трех показателей эффективности – коэффициента детерминации (R^2), корня из среднеквадратичной ошибки (RMSE) и суммы квадратов ошибок (SSE). В уравнениях достаточно высокие коэффициенты детерминации и небольшие RMSE и SSE и уровень значимости критерия Стьюдента не превышает 0,05. Доля дисперсии зависимой переменной, объясняемой применяемыми моделями, составляет 98–99%.

Установлено, что коэффициент корреляции между интенсивностью транспирации (E) и скоростью ксилемного потока (Sf) равнялась 0,784562, а между интенсивностью транспирации и устьичной проводимостью g_s – 0,638624.

Разработанная математическая модель зависимости биологических процессов от условий среды позволяет определять потенциальный уровень процесса, условия его проявления, границы оптимума, возможности компенсации лимитирующих факторов и другие показатели, характеризующие потребности и пластичность организма.

Рассчитанные коэффициенты корреляции между независимыми и зависимыми переменными показывают, что скорость ксилемного потока в побеге растения (Sf, от.ед.) имеет более тесные корреляционные связи с факторами внешней среды – освещенностью (ФАР), температурой воздуха (Тв), и дефицитом влажности воздуха (ДДВП), чем изменение диаметра побега. Диаметр побега (dп, мм) имеет положительную корреляционную связь с относительной влажностью воздуха (0,33008), с остальными факторами внешней среды эта связь отрицательна.

Практический выход разработанной модели с соответствующими количественными характеристиками заключается в том, что в перспективе можно будет прогнозировать экологическое состояние определенного региона.

Литература / References

Анненков А.А. Методические рекомендации по изыскательским работам для проектирования объектов озеленения в Крыму. Ялта, 1984. 26 с.

[Annenkov A.A. Methodological recommendations on survey work for the design of landscaping facilities in the Crimea. Yalta, 1984. 26 p.]

Генкель П.А. Физиология жаро- и засухоустойчивости растений. М.: Наука, 1982. 280 с.

[Genkel P.A. Physiology of heat and drought resistance of plants. M.: Nauka, 1982. 280 p.]

Дроздов С.Н., Курец В.К. Некоторые аспекты экологической физиологии растений. Петрозаводск: ПетрГУ, 2003. 172 с.

[Drozdov S.N., Kurets V.K. Some aspects of ecological physiology of plants. Petrozavodsk: PetrSU, 2003. 172 p.]

Дроздов С.Н., Попов Э.Г., Курец В.К. Влияние света и температуры на нетто-фотосинтез и дыхание *Betula pendula* var. *pendula* и *Betula pendula* var. *carelica* (Betulaceae) // Ботанический журнал. 1995. Т. 80, № 3. С. 60–64.

[Drozdov S.N., Popov E.G., Kurets V.K. Influence of light and temperature on net photosynthesis and respiration of *Betula pendula* var. *pendula* and *Betula pendula* var. *carelica* (Betulaceae). *Botanical Journal*. 1995. 80 (3): 60–64]

Ильницкий О.А., Плугатарь Ю.В., Корсакова С.П. Методология, приборная база и практика проведения фитомониторинга. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. 233 с. [Ilitsky O.A., Plugatar Yu.V., Korsakova S.P. Methodology, instrument base and practice of phytomonitoring. Simferopol: PH "ARIAL", 2018. 233 p.]

Плугатарь Ю.В., Корсакова С.П., Ильницкий О.А. Экологический мониторинг Южного берега Крыма. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. 162 с.

[Plugatar Yu.V., Korsakova S.P., Ilitsky O.A. Ecological monitoring of the Southern Coast of the Crimea. Simferopol: PH "ARIAL", 2015. 162 p.]

Korshikov I.I., Ducci F., Terliga N., Bychkov S., Gorlova E. Allozyme variation of *Pinus pallasiana* D. Don in Natural Crimean populations and in plantations in technogenously-polluted areas of the Ukraine steppes // *Annals of Forest Science*. 2004. Vol. 61. P. 389–396. DOI: 10.1051/forest:2004032

Korshikov E.A., Mudrik O.V., Krasnoshtan T.I., Velikorid'ko L.A., Kalafat D.Yu. Age Dynamics of the Population Gene Pool of the Crimean Pine (*Pinus pallasiana* D. Don) in Crimea // *Cytology and Genetics*. 2011. Vol. 45. No. 1. p. 33–37.

Lapa G., Morandini F., Ferrat L. Sap flow and photosynthetic response to climate and drought of *Pinus nigra* in a Mediterranean natural forest // *Trees*. 2017. Vol. 31. P. 1711–1721. DOI: 10.1007/s00468-017-1580-0

Giorgi F., Lionello P. Climate change projections for the Mediterranean region // *Global and Planetary Change*. 2008. P. 90–104. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.005

Poyatos R., Llorens P., Piñol J., Rubio C. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and pubescent oak (*Quercus pubescens* Willd.) to soil and atmospheric water deficits under Mediterranean mountain climate. // *Annals of Forest Science*. 2008. Vol. 65 (3). P. 306–306. DOI:10.1051/forest:2008003.

Sperlich D., Chang C.T., Peñuelas J., Gracia C., Sabaté S. Seasonal variability of foliar photosynthetic and morphological traits and drought impacts in a Mediterranean mixed forest // *Tree Physiology*. 2015. Vol. 35. P. 501–520. DOI:10.1093/treephys/tpv017

Zhang W., He K., Wang Y., Wang B., Deng J., Zhou Y., Zhong X., Li Z. Effects of light radiation intensity on photosynthetic characteristics and water use efficiency of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis* seedlings // *Frontiers of Forestry in China*. 2007. Vol. 2(2). P. 192–197. DOI: 10.1007/s11461-007-0031-2

Larcher W. Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups. Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 506 p.

Kint V., Aertsen W., Fyllas N.M., Trabucco A., Janssen E., Özkan K., Muys B. Ecological traits of Mediterranean tree species as a basis for modelling forest dynamics in the Taurus mountains, Turkey // *Ecological Modelling*. 2014. Vol. 286. P. 53–65.

Nevzat G., Ayşe D., Dilek Y. Effects of irrigation and fertilization on the growth of juniper seedlings Der Einfluss von Bewässerung und Düngung auf das Wachstum von Wacholdersämlingen // *Austrian Journal of Forest Science*. 2014. Heft 3. S. 171–190.

Meletiyou-Christou M.S., Rhizopoulou S. Leaf functional traits of four evergreen species growing in Mediterranean environmental conditions // *Acta Physiologiae Plantarum*. 2017. Vol. 39. N 1. P. 34–46. DOI: 10.1007/s11738-016-2330-4.

Güney A., Zweifel R., Türkan S., Reiner Z., Magnus W., Coşkun O.G. Drought responses and their effects on radial stem growth of two co-occurring conifer species in the Mediterranean mountain range // *Annals of Forest Science*. 2020. Vol. 77. Article. 105. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-01007-2>

Mohamed A.B.A., Nicole D.W. Use and Soil Moisture Relationships on Western Juniper Trees at Different Growth Stages // Water. 2020. Vol. 12. P. 1596.

Jones H.G., Archer N., Rotenberg E., Casa R. Radiation measurement for plant ecophysiology // Journal of Experimental Botany. 2003. Vol. 54(384). P. 879–889. DOI: 10.1093/jxb/erg116

Статья поступила в редакцию 10.10.2022 г.

Ilitsky O.A., Pashtetsky A.V. Simulation of the features of the water regime of *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* with the use of ecophysiological parameters in the conditions of the Southern Coast of the Crimea // Plant Biology and Horticulture: theory, innovation. 2022. № 4 (165). P. 27-39

To study the ecophysiological response of *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* on the impact of environmental factors during the growing season, we applied a mathematical model of stepwise regression analysis. As dependent variables, we used the relative speed of sap flow in the shoot (Sf., from. units.) - sap flow sensor SF-5P and the diameter of the sap (d, mm.) - sensor SD-10z. The independent variables were the main environmental factors. The proportion of variance in the dependent variable explained by the applied models is 97%. The practical output of the developed model with the corresponding quantitative characteristics is that in the future it will be possible to predict the ecological state of a certain region.

Key words: *Pinus nigra* subsp. *pallasiana*; mathematical model; forecast; optimal and limiting environmental conditions