

Оригинальная статья / Original article
УДК 582.923.5:58.032
DOI: 10.18470/1992-1098-2022-4-50-60

Моделирование особенностей водного режима *Juniperus excelsa* М. Вieb при помощи экофизиологических параметров в условиях Южного берега Крыма

Андрей В. Паштецкий, Олег А. Ильницкий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН», Ялта, Россия

Контактное лицо

Андрей В. Паштецкий, кандидат экономических наук, лаборатория фитомониторинга, ФГБУН «НБС-ННЦ»; 298648 Россия, Республика Крым, г. Ялта, пгт Никита, Никитский спуск, 52.
Тел. +79892704070
Email pashteckiy@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4428-4944>

Формат цитирования

Паштецкий А.В., Ильницкий О.А.
Моделирование особенностей водного режима *Juniperus excelsa* М. Вieb при помощи экофизиологических параметров в условиях Южного берега Крыма // Юг России: экология, развитие. 2022. Т.17, N 4. С. 50-60. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-4-50-60

Получена 10 августа 2022 г.
Прошла рецензирование 27 сентября 2022 г.
Принята 25 октября 2022 г.

Резюме

Цель. В связи с глобальным изменением климата и увеличением интенсивности аридизации региона Южного берега Крыма (ЮБК) необходимо изучить экофизиологическую реакцию *Juniperus excelsa* М. Вieb во время его интенсивной вегетации на воздействие внешних факторов среды, оказывающих большое влияние на особенности водного режима, позволяющих установить возможные оптимальные и неблагоприятные условия произрастания вида.

Материал и методы. Измерения параметров внешней среды проводили с помощью беспроводной системы фитомониторинга. При статистической обработке данных использовались прикладные компьютерные программы. Моделирование и сглаживание двумерных данных проводилось по методам наименьших квадратов, робастной локально-взвешенной регрессии и математической модели пошагового регрессионного анализа.

Результаты. Для оценки экофизиологической реакции в период вегетации *Juniperus excelsa* М. Вieb на воздействие внешних факторов среды, мы применили математическую модель пошагового регрессионного анализа. В качестве зависимых переменных мы использовали относительную скорость водного потока в побеге (S_f , от. ед.) и диаметр побега (d , мм.), данные были получены с датчиков водного потока SF-5P и датчиков SD-10z. Независимыми переменными являлись основные факторы внешней среды. Доля дисперсии зависимой переменной, объясняемой применяемыми моделями составляет 98–99%.

Выводы. Разработка модели на основе базы данных функций растений с соответствующими количественными характеристиками позволит в перспективе прогнозировать экологическое состояние конкретного ареала или региона в целом.

Ключевые слова

Juniperus excelsa М. Вieb., экофизиологическая реакция, водный режим, прогноз, оптимальные, предельные условия окружающей среды, экологическое состояние.

Modeling of various life processes of *Juniperus excelsa* M. Bieb to determine optimal growing conditions in the southern coast of Crimea, Russia

Andrey V. Pashtetsky and Oleg A. Ilitsky

National Scientific Centre, Labour Red Banner Order Nikita Botanical Gardens, Russian Academy of Sciences, Nikita, Yalta, Russia

Principal contact

Andrey V. Pashtetsky, Candidate of Economic Sciences, Phytomonitoring Laboratory, National Scientific Centre, Nikita Botanical Gardens, Russian Academy of Sciences; 52 Nikitsky Spusk., Nikita, Yalta, Republic of Crimea, Russia 298648.

Tel. +79892704070

Email pashteckiy@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4428-4944>

How to cite this article

Pashtetsky A.V., Ilitsky O.A. Modeling of various life processes of *Juniperus excelsa* M. Bieb to determine optimal growing conditions in the southern coast of Crimea, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2022, vol. 17, no. 4, pp. 50-60. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2022-4-50-60

Received 10 August 2022

Revised 27 September 2022

Accepted 25 October 2022

Abstract

Aim. In connection with global climate change and an increase in the intensity of aridisation of the region of the southern coast of Crimea (SCC), the aim is to study the ecophysiological response of *Juniperus excelsa* M. Bieb is, during its intensive vegetative phase, and the impact of external environmental factors that greatly influence the characteristics of the water regime, which would allow the possible establishment of optimal and unfavorable conditions for the growth of the species.

Material and Methods. Measurements of environmental parameters were carried out using a wireless phytomonitoring system. Applied computer programs were used for statistical data processing. Modeling and smoothing of two-dimensional data was carried out using the least squares method, robust locally weighted regression and a mathematical model of stepwise regression analysis.

Results. To assess the ecophysiological response to the impact of external environmental factors during the growing season of *Juniperus excelsa* M. Bieb, we applied a mathematical model of stepwise regression analysis. As dependent variables, we used the relative water flow velocity in the shoot (Sf, r.u.) and shoot diameter (d, mm), data were obtained from SF-5P water flow sensors and SD-10z sensors. The independent variables were the main environmental factors. The share of dispersion of the dependent variable, explained by the applied models, was determined as 98–99%.

Conclusions. The development of a model based on a database of plant functions with appropriate quantitative characteristics will make it possible in the future to predict the ecological state of a particular area or region as a whole.

Key Words

Juniperus excelsa M. Bieb., ecophysiological response, water regime, forecast, optimal, limiting environmental conditions, ecological state.

ВВЕДЕНИЕ

Особенности климата Средиземноморского региона и, в частности, Южного берега Крыма (ЮБК), являющегося регионом сухих субтропиков, позволяют сохранять естественную растительность, закладывать новые и реконструировать существующие зеленые насаждения, которые находятся в условиях микроклимата, формируемого окружающей средой [1–3]. Будущие климатические сценарии предсказывают, что Средиземноморский регион будет среди наиболее пострадавших частей мира с точки зрения увеличения частоты и интенсивности засух [4].

Адаптироваться к новым условиям смогут только те растения, которые обладают достаточной экологической пластичностью, что подтверждает важность исследований состояния и функций растений, находящихся под воздействием антропогенных или природных факторов среды [5; 6]. Одним из таких видов является Можжевельник высокий (*Juniperus excelsa* M. Bieb.). Особенности произрастания данного вида в условиях ЮБК показаны в работах [2; 5; 7]. В работе Ларина Т.Г. [2] рассмотрены особенности структуры фитоценозов формации *Junipereta excelsae* в Горном Крыму. Экстраполяция результатов формирования насаждений этого вида в заповеднике «Мыс Мартьян» представлены в работе Григорова А.Н. [5] и им дан прогноз их дальнейшего развития. Kint V. и другие провели исследования по определению экологических признаков *Juniperus excelsa* для моделирования их динамики в горах Таурус (Средиземноморье – Турция) [6].

Зарубежными учеными, для определения требований к месту обитания Можжевельника высокого в Турции, были проведены исследования леса вдоль градиента между средиземноморским и континентальным климатом [8]. В работе Чернявской И.В. и других [4] представлены результаты интродукционных испытаний, проводимых в Ботаническом саду Адыгейского государственного университета, на представителях рода *Juniperus excelsa* L, в том числе и *J. excelsa*, и исследования основных параметров их водного режима.

Особенности транспирационного характера *Juniperus macrocarpa* изучались с применением методов сокодвижения (типа Гранье) в Западном Крите [9]. Годовые тенденции сокодвижения в целом имели колоколообразную форму и значительно различались в зависимости от сезона и класса полога. Зимой сокодвижение было минимальным, но деревья были активны, когда температура была выше точки замерзания, а транспирация деревьев зависела от глубины залегания в почве. Полученные данные показали, что климат Крита не ограничивает распространение *J. macrocarpa* в данном регионе и позволяют определить степень адаптированности растений к тем или иным условиям среды [10–14].

Целью работы было исследование экофизиологической реакции *Juniperus excelsa* M. Bieb., во время его интенсивной вегетации, на воздействие внешних факторов среды, оказывающих большое влияние на особенности водного режима, позволяющих установить возможные оптимальные и неблагоприятные условия произрастания вида в природно-климатических условиях ЮБК.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Можжевельник высокий (*Juniperus excelsa* M. Bieb.) – гемиксерофильный реликтовый представитель рода Можжевельник (*Juniperus*), относящийся к семейству Кипарисовые (*Cupressaceae*). Произрастает на территории восточного Средиземноморья, а именно от северо-восточной части Греции до южной Болгарии, а также в Турции, Сирии, Ливане, встречается в горах Кавказа, на территории Крыма растет от мыса Айя до горно-вулканического массива Карадаг. Произрастает в нижних горных поясах до высоты 400 м над уровнем моря на солнечных сухих склонах, особенно на кальцитных почвах и представляет собой вечнозеленое хвойное дерево или кустарник высотой 10–15 м [15; 16]. Густая, конусообразная крона имеет пирамидальную или округлую форму. Хвоя на концах побегов – игольчатая, длинная и раскидистая. Корневая система поверхностная. Растение однодомное и размножается семенами. В Крыму репродуктивный цикл, а именно период от заложения шишек до созревания семян составляет 27 месяцев, при этом фаза пыления длится с середины января до апреля [7].

Проведение исследований осуществлялось в условиях вегетационного опыта на территории Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН» [15]. Опытными образцами выступали саженцы, выращенные из черенков, в возрасте 3–4 лет. Период выполнения опытов длился с июня по сентябрь 2019–2020 гг.

Измерения параметров внешней среды проводили беспроводной системой фитомониторинга, а именно фитомонитором модели PM-11z фирмы “Bioinstruments S.R.L.” [17], набором беспроводных датчиков и метеостанцией модели DWS-11z, в которую входят пиранометр (Apogee Instruments, США), датчик температуры и влажности воздуха, дождемер (Decagon Devices, США) и анемометр (Davis Instruments (США). Измерения диаметра ствола осуществляли датчиком FI-Sz и SD-10z, относительную скорость водного потока в побеге (Sf, от. ед.) – датчиком водного потока SF-5P, диаметр стебля (d, мм.) – датчик SD-10z, которые были подключены в вышеуказанную систему фитомониторинга.

При статистической обработке данных использовали прикладные компьютерные программы Statistica 10 (“Statsoft Inc.”, США) и Microsoft Excel 2010. Моделирование и сглаживание двумерных данных проводилось по методам наименьших квадратов, робастной локально-взвешенной регрессии и математической модели пошагового регрессионного анализа. Все расчеты осуществляли с учетом уровня значимости $P \leq 0,05$ [15; 18].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фитомониторинг с поддержкой прогрессивных информационно-измерительных систем позволяет выполнить комплексную оценку состояния и функций растения, находящиеся под воздействием антропогенных или природных факторов. Функции приборной базы фитомониторинга представлены непрерывным мониторингом характеристик исследуемых видов и параметров среды, и системным анализом данных с изменениями их во времени [19].

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 [13]. 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.

Благодаря серии опытов, проведенных в тепличных условиях в течение всего периода вегетации, были получены данные об ответных реакциях Можжевельника высокого на воздействие абиотических факторов. В наших исследованиях синхронно с регистрацией параметров внешней среды (независимые переменные), регистрировалась ряд зависимых переменных, в том числе и скорость водного потока в побеге, и изменение диаметра этого побега. Установлено, что коэффициент корреляции между интенсивностью транспирации (E) и скоростью водного потока (Sf) равнялся 0,814566, а между устьичной проводимостью и интенсивностью транспирации (gs) – 0,688625.

Ирригационным индикатором отклика/реакции вида на водоснабжение могут выступать показатели измерения относительной скорости водного потока и диаметра побега, так как объединяют в себе показатели доступной для растения влаги в почве и параметры внешней среды [16; 18].

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.

Зависимые переменные представлены скоростью водного потока в побеге растения (Sf, от. ед.), и показателем изменения диаметра этого побега (d, мм), а независимые переменные – ФАР (I) – фотосинтетической активной радиацией, мкмоль/м²с; Тв – температурой воздуха, °C; Тр – температурой точки росы, °C; Н – влажностью воздуха, %; VPD – дефицитом влажности воздуха, кПа. Число наблюдений (длина ряда) составляла 7546. Зависимая переменная рассчитывалась по формуле:

$$v12=b0+b1*v3-b2*v4-b3*v5+b4*v6-b5*v7$$

где v – номера зависимой и независимой переменной в таблице.

Ниже приведено уравнение множественной регрессии для скорости водного потока в побеге растения (Sf, от. ед.).

Уравнение имеет вид:

$$Sf=4,240832+1,044455*VPD-0,033110*H--0,317513*Тв+0,249637*Тр^{0C}-0,000033*I$$

Точность аппроксимации выбранной модели основана на трех показателях (табл. 1–3) эффективности – 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 и уровень значимости критерия Стьюдента не превышает 0,05.

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

Таблица 1. Итоговые статистики

Table 1. Summary statistics

Итоговые статистики; ЗП:Пер12 (Таблица данных) Summary statistics; ZP:Per12 (Data table)	
Показатели / Indicators	Значение / Value
Множест. R / Multiple R	0,991850682
Множест. R ² / Multiple R ²	0,983767776
Скоррект. R ² / Multiple R ²	0,983757021
F(5,7546)	91466,3531
p	0
Стд. Ош. Оценки / Standard Error of Estimation	0,148611014

Таблица 2. Итоги регрессии для зависимой переменной

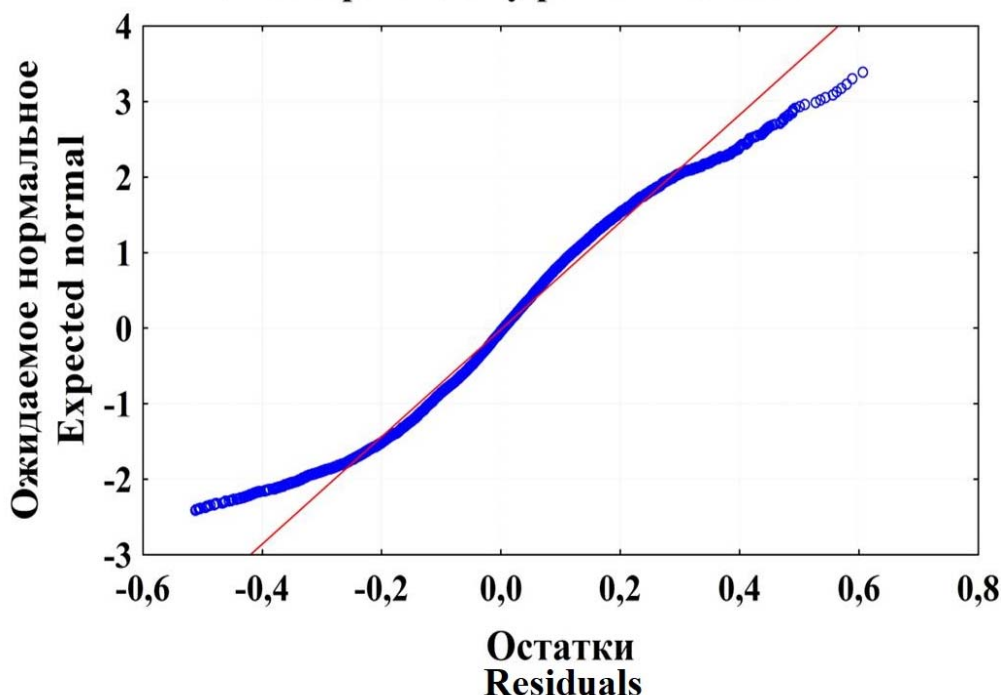
Table 2. Dependent variable regression outcomes

Итоги регрессии для зависимой переменной: Пер12 (Таблица данных) R= ,99185068 R ² = ,98376778 Скоррект. R ² = ,98375702 F(5,7546)=91466, p=0000 Dependent Variable Regression Totals: Per12 (Data table) R= ,99185068 R ² = ,98376778 Adjusted R ² = ,98375702 F(5.7546)=91466, p=0000						
N=7546	БЕТА BETA	Ст.Ош. – БЕТА St. error – BETA	B	Ст.Ош. – B St. error – B	t(7546)	p-знач. r-meaning
Св. член Fr. member			4,240832	0,058278	72,770	0,000000
Пер3 / Var3	1,33700	0,002096	1,044455	0,001637	637,874	0,000000
Пер4 / Var4	-0,46113	0,009145	-0,033110	0,000657	-50,423	0,000000
Пер5 / Var5	-1,38587	0,010167	-0,317513	0,002329	-136,312	0,000000
Пер6 / Var6	0,81690	0,007937	0,249637	0,002426	102,917	0,000000
Пер7 / Var7	-0,01242	0,002299	-0,000033	0,000006	-5,402	0,000000

Таблица 3. Коэффициенты (b0 – b5) при независимых переменных в уравнении**Table 3.** Coefficients (b0 – b5) for independent variables in the equation

Модель: $v_{12}=b_0+b_1*v_3-b_2*v_4-b_3*v_5-b_4*v_6-b_5*v_7$ (Таблица данных) Зав. пер.: Пер9 Потери: (OBS-PRED)**2 Итоговые потери: 166,665 R=,9985 Объяснён. дисперс.: 98 Model: $v_{12}=b_0+b_1*v_3-b_2*v_4-b_3*v_5-b_4*v_6-b_5*v_7$ (Data table) Dependent Variables: Per9 Losses: (OBS-PRED)**2 Total Losses: 166.665 R=,9985 Explained variance: 98						
N=7546	b0	b1	b2	b3	b4	b5
Оценка / Grading	4,240832	1,044455	-0,03311	-0,31751	0,249637	-0,00003

Нормальный вероятностный график остатков Normal probability plot of residuals

**Рисунок 1.** Зависимость между нормальным вероятностным графиком остатков и ожидаемым нормальным
По оси X – остатки**Figure 1.** Relationship between the normal probability plot of the residuals and the expected normal
X-axis – residuals

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

На рисунке 3 представлена диаграмма размаха независимых переменных в уравнении. Наибольший размах наблюдается у ФАР (I).

Доля дисперсии зависимой переменной разработанной модели составляет 98 % и 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, мкмоль/м²с; Тв – температура воздуха, °С; Тр – температура точки росы, °С; Н – влажность воздуха, %; VPD – дефицит влажности воздуха, кПа. Уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$v_9 = b_0 + b_1 * v_3 - b_2 * v_4 - b_3 * v_5 - b_4 * v_6 - b_5 * v_7$$

Модель:

$$d = 5,237866 + 1,051950 * VPD - 0,029296 * H - 0,317839 * T_v + 0,236860 * T_r - 0,000080 * I$$

Число наблюдений (длина ряда) также составляло 7546.

В табл. 4–6 показана точность аппроксимации выбранной модели на основе трех показателей эффективности – коэффициента детерминации (R²), 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.

На рис. 4 представлена зависимость между нормальным вероятностным графиком остатков и ожидаемым нормальным.

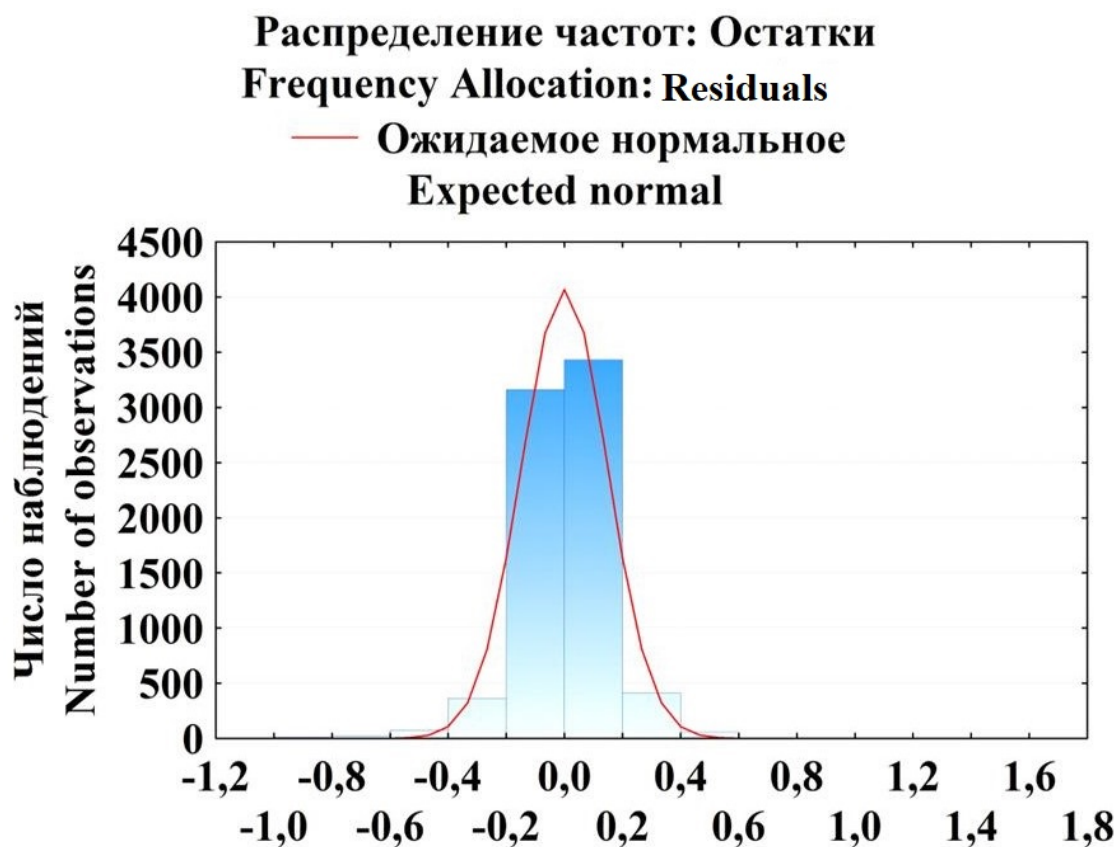


Рисунок 2. Зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением
 Figure 2. Relationship between the number of observations and the expected normal distribution

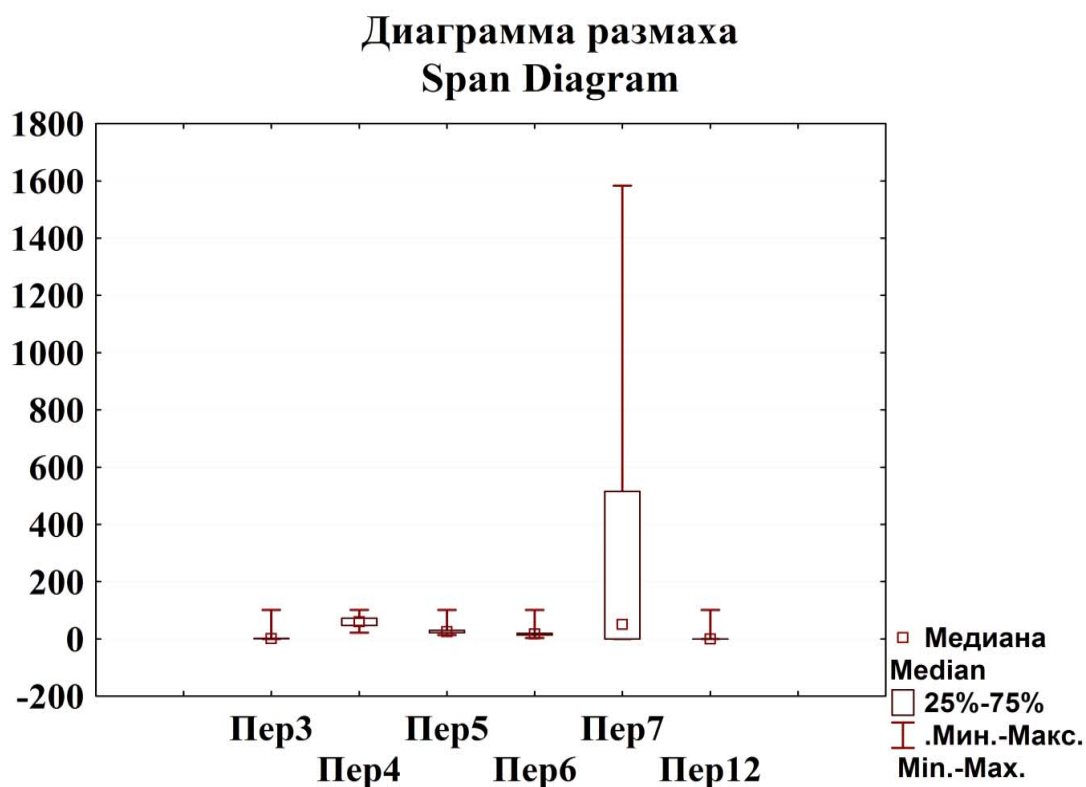


Рисунок 3 Диаграмма размаха независимых переменных в уравнении
 Figure 3 Range diagram of independent variables in the equation

Таблица 4. Итоговые статистики

Table 4. Summary statistics

Итоговые статистики; ЗП:Пер9 (Таблица данных) / Final statistics; ZP:Per9 (data table)	
Показатели / Indicators	Значение / Meaning
Множест. R / Multiple R	0,995553791
Множест. R ² / Multiple R ²	0,99112735
Скоррект. R ² / Multiple R ²	0,991121472
F(5,7546)	168608,881
p	0
Стд. Ош. Оценки / Standard Error of Estimation	0,154572259

Таблица 5. Итоги регрессии для зависимой переменной

Table 5. Dependent variable regression outcomes

Итоги регрессии для зависимой переменной: Пер9 (Таблица данных)						
R= ,99555379 R ² = ,99112735 Скоррект. R ² = ,99112147						
F(5,7546)=1686E2 p=0000						
Regression Totals for Dependent Variable: Per9 (Data Table)						
R= .99555379 R ² = .99112735 Adjusted R ² = .99112147						
F(5,7546)=1686E2 p=0000						
N=7546	БЕТА BETA	Ст.Ош. – БЕТА St. error – BETA	B	Ст.Ош. – B St. error – B	t(7547)	p-знач. r-meaning
Св. член Fr. member			5,237866	0,060443	86,658	0,000000
Пер3 / Var3	1,21086	0,001454	1,051950	0,001263	832,594	0,000000
Пер4 / Var4	-0,29013	0,006757	-0,029296	0,000682	-42,940	0,000000
Пер5 / Var5	-1,00067	0,007554	-0,317839	0,002399	-132,461	0,000000
Пер6 / Var6	0,56889	0,006029	0,236860	0,002510	94,367	0,000000
Пер7 / Var7	-0,02104	0,001699	-0,000080	0,000006	-12,382	0,000000

Таблица 6. Коэффициенты (b0 – b4) при независимых переменных в уравнении

Table 6. Coefficients (b0 – b4) for independent variables in the equation

Модель: v9=b0+b1*v3-b2*v4-b3*v5-b4*v6-b5*v7 (Таблица данных)						
Зав. пер.: Пер9 Потери: (OBS-PRED)**2 Итоговые потери: 180,31732672						
R= ,99555 Объяснён. дисперс.: 99						
Model: v9=b0+b1*v3-b2*v4-b3*v5-b4*v6-b5*v7 (Data Table)						
Dependent variable: Per9 Loss: (OBS-PRED)**2 Total loss: 180.31732672						
R=.99555 Explained variance: 99						
N=7546	b0	b1	b2	b3	b4	b5
Оценка / Grading	5,237866	1,051950	-0,02929	-0,31783	-0,236860	-0,00008

Нормальный вероятностный график остатков
Normal probability plot of residuals

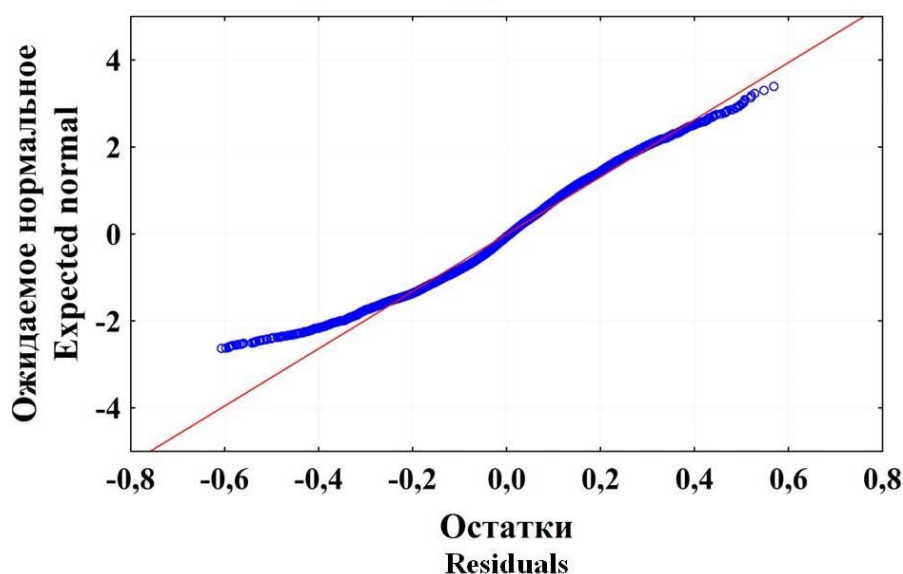


Рисунок 4. Зависимость между нормальным вероятностным графиком остатков и ожидаемым нормальным

Figure 4. Relationship between the normal probability plot of the residuals and the expected normal

Зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением показана на рис. 5.

Диаграмма размаха независимых переменных в уравнении (рис. 6).

Доля дисперсии зависимых переменных разработанных моделей составляет 98–99% и модель вполне удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Для моделей множественной регрессии были рассчитаны коэффициенты корреляции между независимыми переменными (32–46) и зависимыми (Sf, dn).

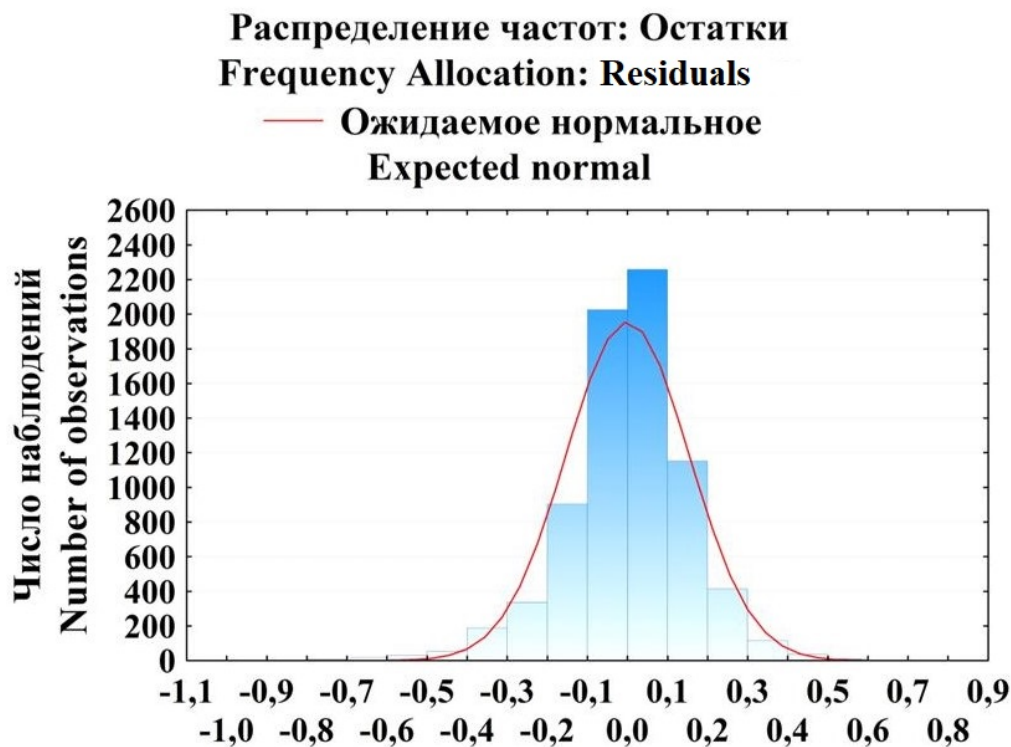


Рисунок 5. Зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением

Figure 5. Relationship between the number of observations and the expected normal distribution

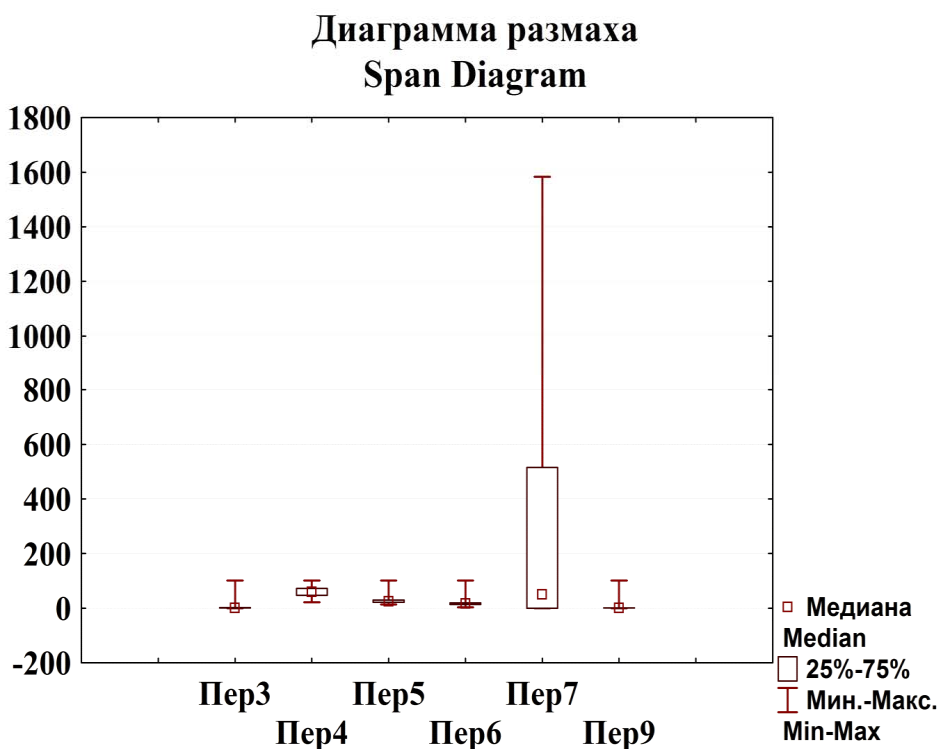


Рисунок 6. Диаграмма размаха независимых переменных в уравнении

Figure 6. Range plot of independent variables in the equation

Из таблицы 7 видно, что скорость водного потока в побеге растения (S_f , от. ед.) имеет более тесные корреляционные связи с факторами внешней среды – освещенностью (ФАР), температурой воздуха (T_v), и дефицитом влажности воздуха (ДДВП) чем изменение диаметра побега.

Доля дисперсии зависимой переменной, объясняемой применяемыми моделями составляет 98–99 %.

На данный момент нет разработанной теоретической и материальной базы для сбора, анализа и представления информации о физиологическом состоянии растительности. Ведется повторяющаяся диагностика растений на определенных территориях, для дальнейшей оценки изменений состояния растений и прогнозирования их развития, учитывая динамику состояния окружающей среды в исследуемом регионе [20–22].

Таблица 7. Коэффициенты корреляции между независимыми переменными (32–46) и зависимыми (S_f , d)
Table 7. Correlation coefficients between independent variables (32–46) and dependent variables (S_f , d)

Независимые переменные Independent variables	Пер32 / Per32	Пер33 / Per33	Пер39 / Per39	Пер42 / Per42	Пер46 / Per46
Зависимые переменные Dependent variables	ФАР (мкмоль/м ² с) Photosynthetically active radiation	Температура воздуха (°C) Air temperature	Относительная влажность воздуха (H, %) Relative humidity	Точка росы (°C) Dew point	ДДВП (кПа) Air humidity deficiency
S_f , отн. ед. S_f , relative unit	0.756325	0.713578	-0.49175	0.307127	0.621301
d , мкм / d, μm	-0.218752	-0.36281	0.258446	-0.14604	-0.32067

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 [23; 24]. Информация позволяет диагностировать физиологическое состояние и свойства генотипа. Результаты этих исследований дают возможность получать данные о состоянии фотосинтеза, водного режима, засухоустойчивости, теневыносливости, особенностях роста и развития растений [25].

Формирование вышеуказанной базы данных функций растений с соответствующими количественными характеристиками и разработка [22] на их основе модели обеспечит в перспективе возможность прогнозирования экологического состояния конкретного ареала или региона в целом.

ВЫВОДЫ

Исследование экофизиологической реакции *Juniperus excelsa* М. Bieb (в период вегетации) на влияние факторов окружающей среды, воздействующих на состояние водного режима, позволило определить ряд параметров, позволяющих построить математические модели этих зависимостей.

Эколого-физиологическая характеристика растений, выраженная в форме математической модели регрессионного анализа, была построена при помощи пошагового регрессионного анализа где качестве зависимых переменных мы использовали скорость водного потока (S_f) в побеге растения и изменение диаметра этого побега (d_p), а независимыми переменными являлись основные факторы внешней среды.

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 (Е) и скоростью водного потока (S_f) равнялась 0,814566, а между интенсивностью транспирации и устьичной проводимостью g_s – 0,688625.

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 переменными показывают, что скорость водного потока в побеге растения (S_f , от.ед.) имеет более тесные корреляционные связи с факторами внешней среды – освещенностью (ФАР), температурой воздуха (T_v), и дефицитом влажности воздуха (ДДВП), чем изменение диаметра побега.

Практический выход разработанной модели с соответствующими количественными характеристиками заключается в том, что можно будет прогнозировать экологическое состояние определенного региона [22].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анненков А.А., Иванов В.Ф., Хохрин А.В. Акимов Ю.А. Методические рекомендации по изыскательским работам для проектирования объектов озеленения в Крыму. Ялта, 1984. 26 с.
2. Ларина Т.Г. О структуре фитоценозов формации *Junipereta excelsae* в Горном Крыму // Экология. 1980. N 4. С. 38–44.
3. Ильницкий О. А. Плугатарь Ю. В. Взаимосвязь динамики интенсивности транспирации *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* с фотосинтезом, температурой хвои и некоторыми факторами внешней среды в ходе вегетации в условиях ЮБК // Биология растений и

- садоводство: теория, инновации. 2019. N 1(150). С. 5–12. DOI: 10.36305/2019-1-150-5-12.
4. Чернявская И.В., Толстикова Т.Н., Еднич Е.М. Представители рода *Juniperus excelsa* L в Ботаническом саду Адыгейского государственного университета // Вестник АГУ. 2015. N 4 (171). С. 79–86.
 5. Григоров А.Н. Естественное возобновление и возрастная структура насаждений можжевельника высокого в заповеднике «Мыс Мартыан» // Труды Никитского ботанического сада. 1980. Т. 81. С. 35–44.
 6. Kint V., Aerts 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. V. 286. P. 53–65.
 7. Ена А.В., Фатерыга А.В. Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли, грибы. Симферополь: ООО «ИТ «АРИАЛ», 2015. 480 с.
 8. Özkan K., Gulsoy S., Aerts R., Muys B. Site properties for Crimean juniper (*Juniperus excelsa*) in semi-natural forests of south western Anatolia // *Turkey. J. Environ. Biol.* 2010. V. 31. P. 97–100.
 9. Elhag M., Bahrawi J. Evaluation of the transpiration character of *Juniperus macrocarpa* as an invasive species in western Crete. *Applied ecology and environmental research*. 2018. V. 16(2). P. 1659–1672. DOI: 10.15666/aer/1602_16591672
 10. Кайбейнен Э.Л., Пелконен П. Оптимизация фотосинтеза и транспирации у неотделенных листьев ивы на плантациях быстрого возобновления // Физиология растений. 2007. Т. 54. С. 350–355.
 11. Кайбейнен Э.Л. Параметры световой кривой фотосинтеза у *Salix dasyclados* и их изменение в ходе вегетации // Физиология растений. 2009. Т. 56(4). С. 490–499.
 12. Larcher W. *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2003, 506 p.
 13. Дроздов С.Н., Попов Е.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. N3. С. 60–64.
 14. Дроздов, С.Н., Курец В.К. Некоторые аспекты экологической физиологии растений. Петрозаводск: ПетРГУ, 2003. 172 с.
 15. Ильницкий О.А., Плугатарь Ю.В., Паштецкий А.В. Динамика интенсивности фотосинтеза *Juniperus excelsa* M. Bieb и факторов внешней среды в ходе вегетации вида в условиях Южного берега Крыма // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. N 2. С. 17–20. DOI: 10.31857/S2500-2627-2020-2-17-20
 16. Ильницкий О.А., Плугатарь Ю.В., Паштецкий А.В. Особенности водного обмена *Juniperus excelsa* M. Bieb в условиях прогрессирующей почвенной засухи Южного берега Крыма // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2019. N 3(152). С. 5–14. DOI: 10.36305/2019-3-152-5-14
 17. Ильницкий О.А., Плугатарь Ю.В., Корсакова С.П. Методология, приборная база и практика проведения фитомониторинга. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. 233 с.
 18. Ильницкий О.А., Плугатарь Ю.В., Паштецкий А.В., Гиль А.Т. Влияние летней засухи в условиях Южного берега Крыма на фотосинтез и водный режим *Quercus pubescens* Willd // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2021. N 3(160). С. 7–16. DOI: 10.36305/2712-7788-2021-3-160-7-16
 19. Ильницкий О.А., Корсакова С.П., Плугатарь Ю.В. Взаимосвязь между некоторыми экофизиологическими характеристиками хурмы Восточной (*Diospyros kaki* L.) и условиями внешней среды // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2016. Т. 142. С. 84–101.
 20. Nevzat Gürlevik, Ayşe Deligöz, Dilek Yıldız 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 Centralblatt für das gesamte Forstwesen*. 2014. V. 3. P. 171–190.
 21. Meletiou-Christou M.S., Rhizopoulou S. Leaf functional traits of four evergreen species growing in Mediterranean environmental conditions // *Acta Physiol. Plant*. 2017. V. 39. N 1, pp. 34–46. DOI: 10.1007/s11738-016-2330-4.
 22. Плугатарь Ю. В., Ильницкий О. А., Корсакова С. П., Паштецкий А. В. Экологический фитомониторинг: исторический экскурс, состояние и перспективы // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2015. N 114. С. 7–13.
 23. Aylin Güney, Roman Zweifel, Semra Türkan, Reiner Zimmermann. 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, pp. 105. Available at: <https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-020-01007-2> (accessed 24.09.2020)
 24. Abdallah M.A.B., Durfee N., Mata-Gonzalez R., Ochoa C.G., Noller J.S. Water Use and Soil Moisture Relationships on Western Juniper Trees at Different Growth Stages. [Water]. 2020, vol. 12, article id: 1596 Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/6/1596> (accepted 31.05.2020)
 25. Ильницкий О.А., Паштецкий А.В., Гиль А.Т. Особенности роста *Juniperus excelsa* M. Bieb в условиях полевого вегетационного опыта Южного берега Крыма // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2020. V. 2 (155). С. 94–101. DOI: 10.36305/2712-7788-2020-2-155-94-101

REFERENCES

1. Annenkov A.A., Ivanov V.F., Khokhrin A.V. Akimov Yu.A. *Metodicheskie rekomendatsii po izyskatel'skim rabotam dlya proektirovaniya ob'ektov ozeleneniya v Krymu* [Guidelines for survey work for the design of landscaping objects in the Crimea]. Yalta, 1984, 26 p. (In Russian)
2. Larina T.G. On the structure of phytocenoses of the *Juniperus excelsa* formation in the Crimean Mountains. *Ekologiya* [Ecology]. 1980, no. 4, pp. 38–44. (In Russian)
3. Ilnitsky O.A. Plugatar Yu.V. Relationship between dynamics and transpiration intensity of *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* with photosynthesis, needle temperature and some environmental factors during vegetation in the conditions of the South Coast. *Plant Biology and Horticulture: Theory, Innovations*, 2019, no. 1 (150), pp. 5–12. (In Russian) DOI 10.36305/2019-1-150-5-12
4. Chernyavskaya I.V., Tolstikova T.N., Ednich E.M. Representatives of the genus *Juniperus excelsa* L in the Botanical Garden of the Adyge State University. *Vestnik AGU* [Bulletin of ASU]. 2015, iss. 4(171), pp. 79–86. (In Russian)
5. Grigorov A.N. [Natural renewal and age structure of high juniper plantations in the reserve "Cape Martyan"]. In: *Trudy Nikitskogo botanicheskogo sada* [Proceedings of the Nikitsky Botanical Garden]. 1980, vol. 81, pp. 35–44. (In Russian)
6. Kint V., Aerts 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, pp. 53–65.
7. Ена А.В., Фатерыга А.В. *Krasnaya kniga Respubliki Krym. Rasteniya, vodorosli, griby* [Red Book of the Republic of

- Crimea. Plants, algae, fungi]. Simferopol, "ARIAL" Publ., 2015, 480 p. (In Russian)
8. Özkan K., Gulsoy S., Aerts R., Muys B. Site properties for Crimean juniper (*Juniperus excelsa*) in semi-natural forests of south western Anatolia, Turkey. *J. Environ. Biol.* 2010, vol. 31, pp. 97–100.
9. Elhag M., Bahrawi J. Evaluation of the transpiration character of *Juniperus macrocarpa* as an invasive species in western Crete, Greece. *Applied ecology and environmental research*, 2018, vol. 16(2), pp. 1659–1672. DOI: 10.15666/aeer/1602_16591672
10. Kaibeyaynen E.L. Optimization of photosynthesis and transpiration in non-separated willow leaves on plantations of rapid renewal. *Fiziologiya rastenii* [Plant Physiology]. 2007, vol. 54, pp. 350–355. (In Russian)
11. Kaibeyaynen E.L. Parameters of the light curve of photosynthesis in *Salix dasyclados* and their changes during the growing season. *Fiziologiya rastenii* [Plant Physiology]. 2009, vol. 56(4), pp. 490–499. (In Russian)
12. Larcher W. *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. Heidelberg, Springer-Verlag, 2003, 506 p.
13. 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). *Botanicheskii zhurnal* [Botanical Journal]. 1995, vol. 80, no. 3, pp. 60–64. (In Russian)
14. Drozdov S.N., Kurets V.K. *Nekotorye aspekty ekologicheskoi fiziologii rastenii* [Some aspects of ecological plant physiology]. Petrozavodsk, PetrGU, 2003, 172 p. (In Russian)
15. Ilnitsky O.A., Plugatar Yu.V., Pashtetsky A.V. Dynamics of the intensity of photosynthesis of *Juniperus excelsa* M. Bieb and environmental factors during the vegetation of the species in the conditions of the Southern Coast of Crimea. *Russian Agricultural Science*. 2020, no. 2, pp. 17–20. DOI: 10.31857/S2500-2627-2020-2-17-20
16. Ilnitsky O.A., Plugatar Yu.V., Pashtetsky A.V., Features of water exchange of *Juniperus excelsa* M. Bieb under conditions of progressive soil drought on the southern coast of Crimea. *Biology of Plants and Horticulture: Theory, innovation*, 2019, no. 3 (152), pp. 5–14. (In Russian) DOI: 10.36305/2019-3-152-5-14
17. Ilnitsky O.A., Plugatar Yu.V., Korsakova S.P. *Metodologiya, pribornaya baza i praktika provedeniya fitomonitoringa* [Methodology, instrument base and practice of phytomonitoring]. Simferopol, "ARIAL" Publ., 2018, 233 p. (In Russian)
18. Ilnitsky O.A., Plugatar Yu.V., Pashtetsky A.V., Gil A.T. Effect of summer drought in the conditions of the Southern coast of Crimea on photosynthesis and water regime of *Quercus pubescens* Willd. *Biology of plants and gardening: theory, innovation*. 2021, no. 3 (160), pp. 7–16. (In Russian) DOI: 10.36305/2712-7788-2021-3-160-7-16
19. Ilnitsky O.A., Korsakova S.P., Plugatar Yu.V. The relationship between some ecophysiological characteristics of Eastern persimmon (*Diospyros kaki* L.) and environmental conditions. In: *Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* [Collection of scientific works of the State Nikitsky botanical garden]. 2016, vol. 142, pp. 84–101. (In Russian)
20. Nevzat Gürlevik, Ayşe Deligöz, Dilek Yıldız 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 Centralblatt für das gesamte Forstwesen*. 2014, heft 3, pp. 171–190.
21. Meletiou-Christou M.S., Rhizopoulou S. Leaf functional traits of four evergreen species growing in Mediterranean environmental conditions. *Acta Physiol. Plant.* 2017, vol. 39, no. 1, pp. 34–46. DOI: 10.1007/s11738-016-2330-4
22. Plugatar Yu.V., Ilnitsky O.A., Korsakova S.P., Pashtetsky A.V. Ecological phytomonitoring: historical digression, state and prospects. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden]. 2015, no. 114, pp. 7–13. (In Russian)
23. Aylin Güney, Roman Zweifel, Semra Türkan, Reiner Zimmermann. 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, 105 p. Available at: <https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-020-01007-2> (accepted: 24.09.2020)
24. Abdallah M.A.B., Durfee N., Mata-Gonzalez R., Ochoa C.G., Noller J.S. Water Use and Soil Moisture Relationships on Western Juniper Trees at Different Growth Stages. [Water]. 2020, vol. 12, article id: 1596. Available at: https://mdpi-res.com/d_attachment/water/water-12-01596/article_deploy/water-12-01596.pdf?version=1591263763 (accepted: 31.05.2020)
25. Ilnitsky O.A., Pashtetsky A.V., Gil A.T. Features of the growth of *Juniperus excelsa* M. Bieb in the conditions of field vegetation experience of the Southern coast of Crimea. *Biology of plants and gardening: theory, innovations*, 2020, no. 2 (155), pp. 94–101. (In Russian) DOI: 10.36305/2712-7788-2020-2-155-94-101

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Олег А. Ильницкий осуществил сбор данных для исследования. Андрей В. Паштецкий проанализировал полученные первичные данные, провел их статистическую обработку. Оба автора в равной степени участвовали в написании рукописи, и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Oleg A. Ilnitsky collected data for the study. Andrey V. Pashtetsky analysed the obtained primary data and carried out their statistical processing. Both authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Андрей В. Паштецкий / Andrey V. Pashtetsky <https://orcid.org/0000-0002-4428-4944>

Олег А. Ильницкий / Oleg A. Ilnitsky <https://orcid.org/0000-0002-4111-152X>