

УДК 582.923.5:58.032

DOI: 10.36305/0513-1634-2022-145-67-78

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ
UNIPERUS EXCELSA M. ВІЕВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА****Олег Антонович Ильницкий, Андрей Владимирович Паштецкий**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Ордена Трудового
Красного знамени Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»
298648, Республика Крым, г. Ялта, пгт Никита, спуск Никитский, 52
E-mail: ilnitsky.oleg@mail.ru

Для изучения экофизиологической реакции *Juniperus excelsa* M. Bieb на воздействие факторов внешней среды в период вегетации, мы применили математическую модель пошагового регрессионного анализа. В качестве зависимых переменных мы использовали интенсивность ассимиляции (А) и транспирации (Е), независимыми переменными являлись основные факторы внешней среды. Доля дисперсии зависимой переменной, объясняемой применяемыми моделями составляет 96-98%. Практический выход разработанной модели с соответствующими количественными характеристиками заключается в том, что в перспективе можно будет прогнозировать экологическое состояние определенного региона.

Ключевые слова: *Juniperus excelsa* M. Bieb.; математическая модель; водный режим; прогноз; оптимальные и предельные условия окружающей среды

Введение

В условиях усиления аридизации территории Южного берега Крыма (ЮБК) и в связи с глобальным изменением климата [1-5], исследование эколого-физиологических особенностей редких и охраняемых видов – необходимая основа для их сохранения, разработки экологически обоснованной системы охраны и поддержания биоэкологического потенциала. Одним из таких видов является Можжевельник высокий (*Juniperus excelsa* M. Bieb.).

Известны работы по особенностям произрастания данного вида в условиях ЮБК [3, 6].

В работе [3] показаны особенности структуры фитоценозов формации *Junipereta excelsae* M. Bieb в Горном Крыму.

Основные закономерности формирования насаждений этого вида в заповеднике «Мыс Мартыан» и прогноз их дальнейшего развития показаны в работе [6]. Дан анализ возрастной структуры популяции можжевельника с чередованием влажных и сухих многолетних периодов. Естественное возобновление вида позволяет наблюдать начало периода закладки в той части древостоя, которая составит в возрастной структуре основу очередного 30-35- летнего цикла.

Можжевельник *Juniperus excelsa* M. Bieb в последнее время стал одним распространенных видов в лесах Турции. Его выращиванию уделяется значительное внимание в научных исследованиях [7, 8]. Проведены исследования по определению оптимальных размеров сосудов для выращивания рассады *Juniperus excelsa* M. Bieb и состава почвы, собранной в естественной лесной среде вида (13 различных вариантов) [7]. Подобные исследования для данного вида проводились с целью определения оптимальных вариантов водного режима и питательных веществ при выращивании рассады в средиземноморских условиях [8].

В горах Таурус (Средиземноморье – Турция) были проведены исследования по определению экологических признаков для моделирования динамики леса [9, 10].

Для того, чтобы понять состояние лесного сообщества на территории древнего города Sagalassos, расположенном в горах Таурус на юго-западе в прошлом и реконструировать изменение состава лесов и биомасс во времени, предложена модифицированная модель GREFOS. Модель была разработана для северо-восточного Средиземноморского бассейна.

Она была параметризирована на основе обзора литературы и дополнительных полевых измерений на участках с четырьмя зонами растительности в районе исследования для семи наиболее важных видов деревьев, в том числе и для *Juniperus excelsa*. Модель была адаптирована к биоклиматическим условиям гор Таурус, добавлены эффекты поздних заморозков и пожарного модуля. Это позволило наиболее полно заполнить матрицу экологических признаков. В модели были использованы 13 различных параметров: биометрические, климатические, физиологические и их производные.

Проверка качественных и количественных показателей модели показала, что адаптированная модель GREFOS с параметризованными признаками адекватно предсказывают воздействие климата, пожара и абиотических условий участков на динамику естественной растительности (по видам и высотным диапазонам; частично также по базальной области) и на современное состояние климатических условий в горах Таурус.

Дальнейшие этапы развития модели должны быть направлены на включение важных дополнительных факторов растительного состава, таких как изменение климата и землепользование.

Известна работа по исследованию леса в юго-западной Анатолии вдоль градиента между средиземноморским и континентальным климатом, чтобы определить требования к месту обитания *Juniperus excelsa* в Турции. Предложена гипотеза о том, что особенности внешней среды и растения индикаторы могут использоваться для прогнозирования встречаемости *J. excelsa* на данном участке, следовательно, могут способствовать принятию решений при планировании управления восстановлением лесов. Видовой состав растений и параметры внешней среды были оценены на 153 участках. Ассоциация между *J. excelsa* и другими видами растений, и параметрами среды была проанализирована с использованием тестов вероятности Фишера и ступенчатого дискриминантного анализа. Большая высота (> 1000 м), как показатель климата этого региона и высокая каменистость поверхности служили показателем низкой конкуренции со стороны других видов деревьев для *J. excelsa*. Двенадцать видов растений, в том числе травянистые *Dianthus zonatus*, *Ajuga chamaepitys* и *Paronchia carica* и кустарник *Cotoneaster nummularia*, могут быть использованы в качестве индикаторов участка для восстановления *J. excelsa* [11].

Представители рода *Juniperus* L. были интродуцированы в Ботаническом саду Адыгейского государственного университета в том числе и *J. excelsa* [4].

По результатам исследований установлено, что физиологические особенности интродуцированных культиваров рода *Juniperus* характеризовались сезонными изменениями показателей водного обмена. Оводненность, потеря воды и интенсивность транспирации повышалась в октябре и апреле, водный дефицит – в декабре и сентябре. Показатели водообмена *Juniperus chinensis* Keteleerii и *J. virginiana* сходные с *J. sabina*. Наименьшими значениями водного дефицита (5-7%) и потери воды (7-15%) обладали *Juniperus virginiana*, *J. chinensis*, а наибольшими – *J. excelsa* и *J. foetidissima*; их водный дефицит составлял 18-26%, а потери воды – 17-22%. Максимальные значения показателей водного режима у интродуцированных видов соответствовали активности ростовых процессов в весенне-летний период. Таким

образом, полученные данные позволяют определить степень адаптированности растений к тем или иным условиям среды.

Целью работы было исследование зависимостей интенсивности фотосинтеза и транспирации *Juniperus excelsa* M. Bieb от основных факторов внешней среды в процессе активного роста растения и моделирование этих зависимостей, позволяющих определить оптимальные и ограничивающие условия произрастания вида в условиях ЮБК.

Объекты и методы исследования

Можжевельник высокий (*Juniperus excelsa* M. Bieb.) – из рода Можжевельник (*Juniperus*) семейства Кипарисовые (Cupressaceae) – гемиксерофильный реликтовый вид. В восточном Средиземноморье растет от северо-восточной части Греции и южной Болгарии, Турции, Сирии, Ливане и дальше в горах Кавказа. В Крыму растет от мыса Айя до Карадага, а также в Байдарской долине. Подвид *J. excelsa* subsp. *polycarpus* растет в горах восточной части Пакистана (некоторые ученые рассматривают этот подвид как отдельный вид). *J. excelsa* произрастает в нижних горных поясах до высоты 4000 м н.у.м. на солнечных сухих склонах, особенно на кальцитных почвах и представляет собой вечнозеленое хвойное дерево или кустарник высотой 10-15 м. Крона густая, конусообразная, округлой или пирамидальной формы. Корневая система поверхностная. На концах побегов хвоя игольчатая, раскидистая, длинная. Растение однодомное. Шишкоягоды шаровидной формы, диаметр 0,8-1,2 см, расположены на коротких ножках, темно-серо-фиолетового цвета, с сизовато-белым густым налетом. Зреют на второй год после опыления. Чешуек 4-6, по шесть семян в каждой. Растение однодомное. Репродуктивный цикл (от заложения шишек до созревания семян) в Крыму составляет 27 месяцев. Пыление происходит с середины января до апреля. Размножается семенами [2].

Исследования проводились в условиях теплицы на территории центрального отделения Никитского ботанического сада. Растения – саженцы 3-4 лет, выращенные из черенков. Для регистрации газообмена интактных листьев, водного режима и роста растений использовали монитор фотосинтеза RTM-48A и фитомонитор РМ-11z [14]. Монитор РТМ-48А оснащен четырьмя листовыми камерами. Для измерения устьичной проводимости листа дополнительно установлен в листовой камере датчик температуры. Скорость фотосинтеза определяли на молодых неповрежденных листьях (хвое) в верхней части побега каждые 15-20 минут. Концентрация CO₂ в воздухе равнялась, примерно, 0,04%. Интенсивность чистого фотосинтеза (Pn, $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) и транспирацию (E, $\text{mg}/\text{m}^2\text{s}$) измеряли в диапазоне фотосинтетического активного излучения (PAR) от 0 до 2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. Параметры окружающей среды: температуру и влажность воздуха измеряли датчиками метео-модуля RTH-48, подключенными к цифровому входу системы РТМ-48А. Температуру хвои – датчиком LT-1P, подключенным к аналоговым входам РТМ-48А.

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 и робастной локально-взвешенной регрессии, 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 (2020-2021 гг.) позволила получить информацию об ответных реакциях данного вида на воздействие абиотических факторов и ряд экологических и физиологических характеристик жизнедеятельности данного вида. Исследования проводились на протяжении периода активной вегетации *Juniperus excelsa* в мае–октябре месяце. Фитомониторинг

позволяет с помощью современных информационно-измерительных систем осуществить комплексную оценку состояния и функций растения, которая находится под влиянием антропогенных или природных факторов среды.

В зависимости от задачи исследования ЭФХ может включать корреляционные связи, регрессионные зависимости и динамические модели. Эколого-физиологическая характеристика растений, выраженная 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 [12, 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 ассимиляции и транспирации является функцией отклика на воздействие изучаемых факторов окружающей среды. Построение моделей в трехмерном пространстве позволяет найти взаимосвязь между зависимыми и не зависимыми переменными и построить уравнение нелинейной регрессии. В «зону оптимума» попадают точки, со значением интенсивности изучаемого параметра более 90% от максимального значения. Это позволило определить оптимальные и ограничивающие условия максимумов и границы областей оптимумов ассимиляции и численные коэффициенты нелинейных регрессионных уравнений этих зависимостей. На рисунке 1 показана взаимосвязь между ассимиляцией *Juniperus excelsa* (A) и транспирацией (E) (зависимые переменные) и освещенностью (I). Из него видно, что оптимальным значением освещенности $I = 500-900$ мкмоль/м²с. При этом, интенсивность ассимиляции $A=8-10$ мкмоль/м²с, а транспирации $E = 25-30$ мг/м²с. На графике сверху приведено уравнение нелинейной регрессии этих зависимостей (математическая модель).

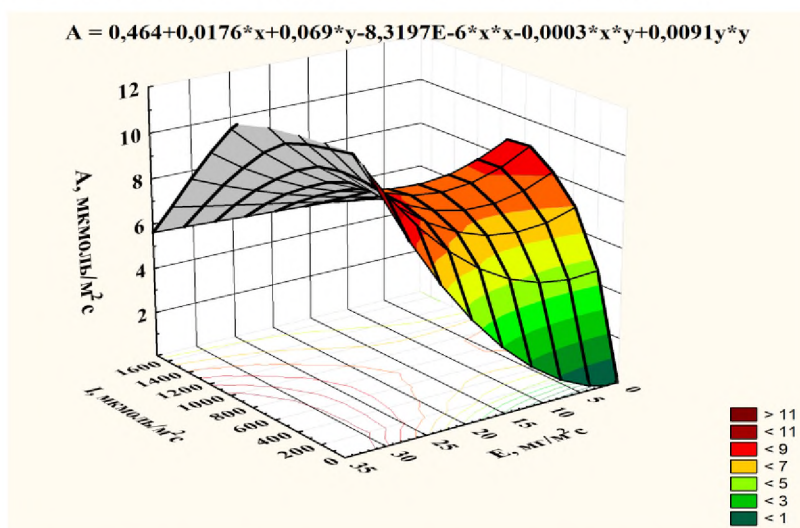


Рис. 1 Взаимосвязь между интенсивностью ассимиляции (A), транспирации (E) и освещенностью (I)

Применение этой модели не позволяет построить уравнение нелинейной регрессии более чем для трех переменных, поэтому мы применили математическую модель пошагового регрессионного анализа.

В модель включались коэффициенты с уровнем значимости р-критерия Стьюдента не превышающего 0.05.

В качестве зависимых переменных в модели использовали интенсивность ассимиляции (А) и транспирации (Е).

Ниже приведена математическая модель где в качестве зависимой переменной была интенсивность ассимиляции, а независимыми переменными являлись: ФАР (I) – фотосинтетически активная радиация, мкмоль/м²с; Тв – температура воздуха, °С; Тп – температура почвы, °С; Wп – влажность почвы, %; VPD – дефицит влажности воздуха, кПа.

Число наблюдений (длина ряда) составляла 715. Зависимая переменная рассчитывалась по формуле:

$V25 = b_0 - b_1 \cdot v_{32} - b_2 \cdot v_{33} + b_3 \cdot v_{39} + b_4 \cdot v_{42} + b_5 \cdot v_{46}$ – где индексом v обозначались номера зависимой и независимой переменной в таблице.

Уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$A = -6,77922 + 0,00600 \cdot I + 0,51082 \cdot T_a - 0,28738 \cdot T_s + 0,24085 \cdot W_s + 0,58367 \cdot VPD$$

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). Доля дисперсии зависимой переменной разработанной модели составляет 98%.

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

Таблица 1

Итоговые статистики	
Итоговые статистики; ЗП:Пер25 (Таблица данных)	
	Значение
Множест. R	0,99074539
Множест. R ²	0,985712441
Скоррект. R ²	0,774130724
F(5,715)	490,4241
p	0
Стд. Ош. Оценки	2,99177397

Таблица 2

Итоги регрессии для зависимой переменной						
Итоги регрессии для зависимой переменной: Пер25 (Таблица данных) R= ,99074539 R ² = ,98571244 Скоррект. R ² = ,98413072 F(5,715)=490,42 p=0,0000						
N=715	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t(709)	p-знач.
Св.член			-6,77922	1,089170	-6,22421	0,000000
Пер32	0,371063	0,028206	0,00600	0,000456	13,15558	0,000000
Пер33	0,489112	0,054561	0,51082	0,056983	8,96449	0,000000
Пер39	-0,238578	0,042740	-0,28738	0,051484	-5,58202	0,000000
Пер42	0,163793	0,025478	0,24085	0,037465	6,42868	0,000000
Пер46	0,352081	0,034360	0,58367	0,056961	10,24690	0,000000

Таблица 3

Коэффициенты (b0 – b5) при независимых переменных в уравнении						
Модель: $v25 = -b_0 + b_1 \cdot v_{32} + b_2 \cdot v_{33} - b_3 \cdot v_{39} + b_4 \cdot v_{42} + b_5 \cdot v_{46}$ (Таблица данных)						
Зав. пер.: Пер25 Потери: (OBS-PRED)**2						
Итоговые потери: 6346,0544554 R= ,98075 Объяснён. дисперс.: 98						
N=715	b0	b1	b2	b3	b4	b5
Оценка	6,779218	0,006003	0,510822	0,287384	0,240852	0,583669

Точность модели – разность между экспериментальными данными и рассчитанными по модели (рис. 2).

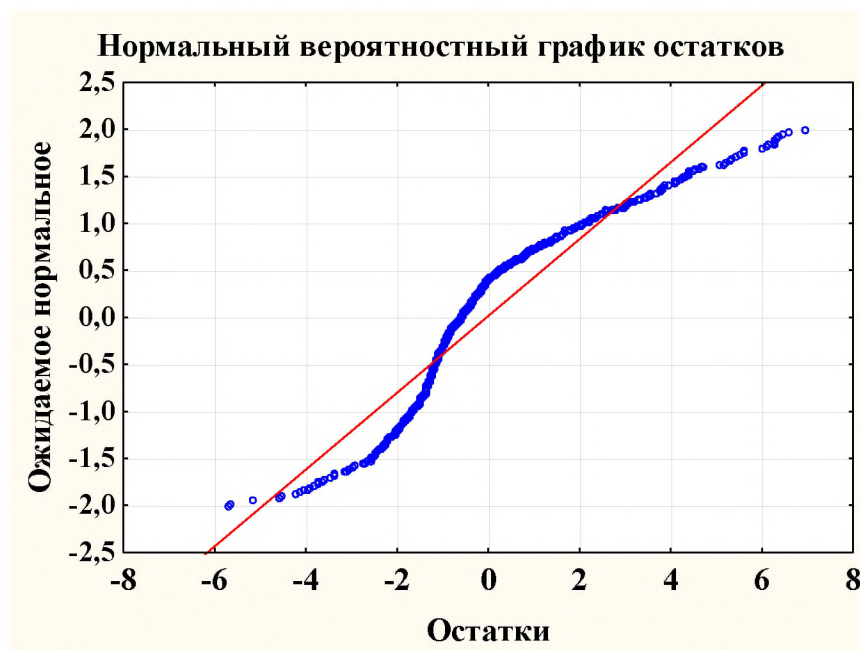


Рис. 2 Зависимость между нормальным вероятностным графиком остатков и ожидаемым нормальным

На рисунке 3 показана зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением.



Рис. 3 Зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением

На рисунке 4 показана диаграмма размаха независимых переменных в уравнении. Наибольший размах наблюдается у ФАР (I).

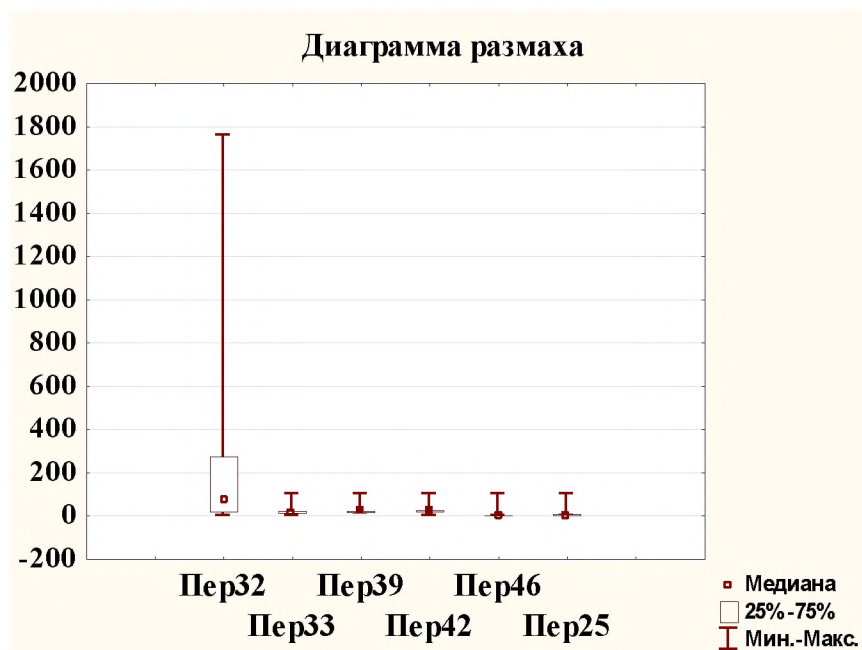


Рис. 4 Диаграмма размаха независимых переменных в уравнении

В качестве второй, зависимой переменных была интенсивность транспирации (E), а независимыми переменными являлись: ФАР (I) – фотосинтетически активная радиация, мкмоль/м²с; Тв – температура воздуха, °С; Тп – температура почвы, °С; Wп – влажность почвы, %; VPD – дефицит влажности воздуха, кПа.

Число наблюдений (длина ряда) составляла 715. Зависимая переменная рассчитывалась по формуле:

$V6 = b1 \cdot v32 - b2 \cdot v33 + b3 \cdot v39 + b4 \cdot v42 + b5 \cdot v46$ – где индексом v обозначались номера зависимой и независимой переменных в таблице.

Уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$E = 0,000354 \cdot I + 0,68801 \cdot T_a - 0,30137 \cdot T_s - 0,12595 \cdot W_s - 0,75663 \cdot VPD$$

Точность аппроксимации выбранной модели основана на трех показателях (таблицы 4-6) эффективности – коэффициента детерминации (R^2), корня из среднеквадратичной ошибки (RMSE) и суммы квадратов ошибок (SSE). Доля дисперсии зависимой переменной разработанной модели составляет 96%.

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

Таблица 4

Итоговые статистики	
Итоговые статистики; ЗП:Пер6 (Таблица данных)	
	Значение
Множест. R	0,982661545
Множест. R2	0,96418494
Скоррект. R2	0,962378337
F(5,715)	411,924879
p	0
Стд. Ош. Оценки	3,55314079

Таблица 5

Итоги регрессии для зависимой переменной						
Итоги регрессии для зависимой переменной: Пер6 (Таблица данных)						
R= ,982664 R2= ,96418494 Скоррект. R2= ,96237834						
F(5,715)=411,92 p=0000						
N=715	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t(708)	p-знач.
Св.член				1,295680	-1,05599	0,291331
Пер32	0,297017	0,030139	0,000354	0,000542	9,85488	0,000000
Пер33	0,592672	0,058309	0,68801	0,067689	10,16440	0,000000
Пер39	-0,224936	0,045693	-0,30137	0,061219	-4,92276	0,000001
Пер42	-0,077008	0,027237	-0,12595	0,044547	-2,82733	0,004826
Пер46	0,410711	0,036756	-0,75663	0,067714	11,17386	0,000000

Таблица 6

Коэффициенты (b0 – b5) при независимых переменных в уравнении					
Модель: $V6 = b1 \cdot v32 + b2 \cdot v33 - b3 \cdot v39 - b4 \cdot v42 + b5 \cdot v46$ (Таблица данных)					
Зав. пер.: Пер6 Потери: (OBS-PRED)**2					
Итоговые потери: 8952,4433371 R= ,96243 Объяснён. дисперс.: 96%					
N=715	b1	b2	b3	b4	b5
Оценка	0,000354	0,68801	-0,30137	-0,12595	-0,75663

На рисунке 5 показана зависимость между нормальным вероятностным графиком остатков и ожидаемым нормальным.

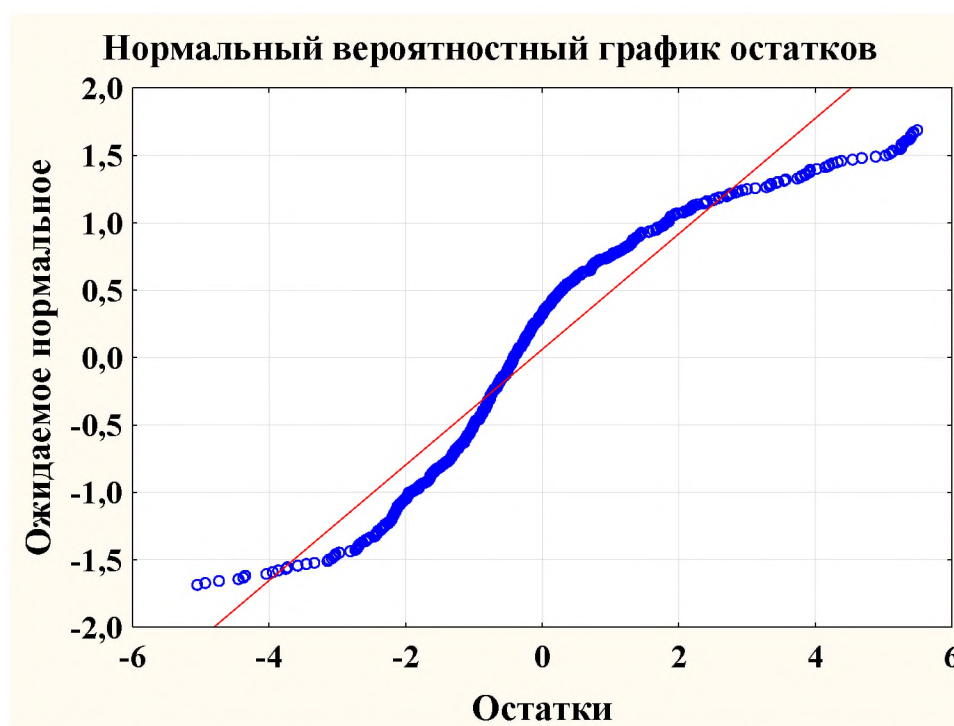


Рис. 5 Зависимость между нормальным вероятностным графиком остатков и ожидаемым нормальным

Зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением показана на рисунке 6.



Рис. 6 Зависимость между числом наблюдений и ожидаемым нормальным распределением

На рисунке 7 показана диаграмма размаха независимых переменных в уравнении.

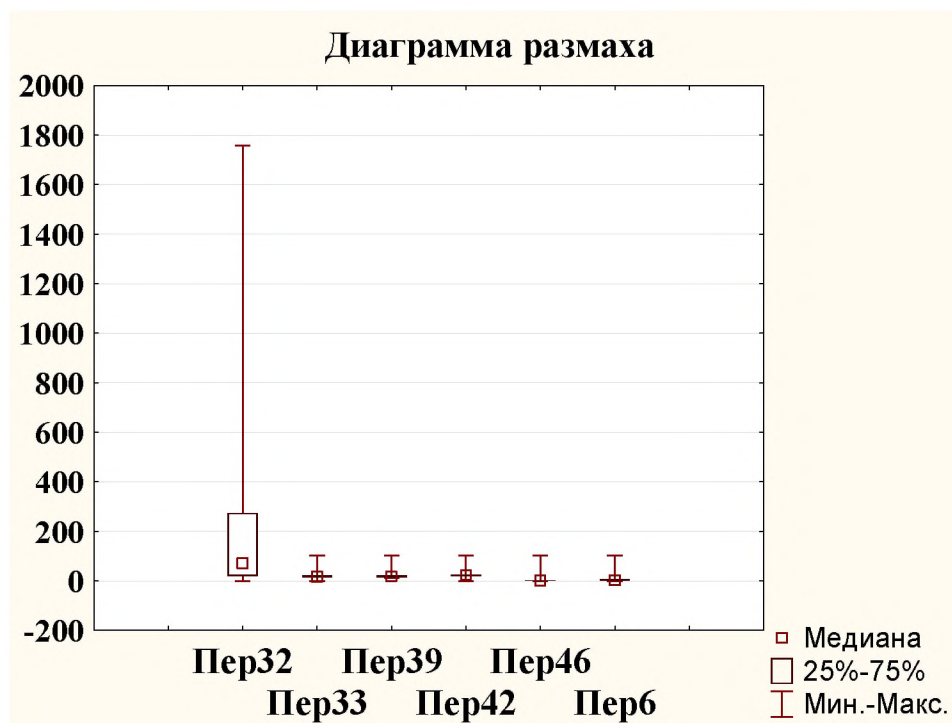


Рис. 7 Диаграмма размаха независимых переменных в уравнении

Доля дисперсии зависимых переменных, объясняемой применяемыми моделями составляет 96-98%.

Для моделей множественной регрессии были рассчитаны коэффициенты корреляции (табл.7) между независимыми переменными (32-46) и зависимыми (А, Е).

Таблица 7

Коэффициенты корреляции между независимыми переменными (32-46) и зависимыми (А, Е)

Независимые переменные	Пер32	Пер33	Пер39	Пер42	Пер46
Зависимые переменные	ФАР (мкмоль/м ² ·с)	Температура воздуха (С)	Температура почвы (С)	Влажность почвы (%VWC)	ДДВП (кПа)
Е, мг/м ² ·с	0.727469	0.74912	0.521135	-0.04698	0.772554
Аг, мкмоль/м ² ·с	0.500818	0.567641	0.342575	-0.01349	0.511881

Рассчитанные коэффициенты корреляции между независимыми и зависимыми переменными показывают, что наиболее тесные корреляционные связи существуют между ними и освещенностью (ФАР), температурой воздуха (Тв) и дефицитом влажности воздуха (ДДВП).

Проведенная серия опытов в тепличных условиях, позволила определить оптимальные и ограничивающие условия произрастания данного вида в условиях ЮБК.

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 [15, 17, 19]. Полученная информация позволяет диагностировать физиологическое состояние и свойства генотипа. Результаты этих исследований дают возможность получать данные об интенсивности фотосинтеза, водного обмена, засухоустойчивости, теневыносливости, особенностях роста и развития растений [18-22].

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 *Juniperus excelsa* на воздействие факторов внешней среды в период вегетации, влияющих на особенности фотосинтеза и водного режима, позволило определить ряд параметров, дающих возможность построить математические модели этих зависимостей.

Построение моделей в трехмерном пространстве позволяет найти взаимосвязь между зависимыми и не зависимыми переменными и построить уравнение нелинейной регрессии. Определена взаимосвязь между ассимиляцией (А) и транспирацией (Е) (зависимые переменные) и освещенностью (I). Оптимальное значение освещенности I = 500-900 мкмоль/м²·с. При этом, интенсивность ассимиляции А=8-10 мкмоль/м²·с, а транспирации Е = 25-30 мг/м²·с. Однако, применение этой модели не позволяет построить уравнение нелинейной регрессии более чем для трех переменных.

Для этого мы использовали математическую модель пошагового регрессионного анализа где в качестве зависимых переменных мы использовали интенсивность

ассимиляции (А) и транспирации (Е). Независимыми переменными являлись основные факторы внешней среды.

Выбранная модель на основана на трех показателях 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 зависимых переменных, объясняемой применяемыми моделями составляет 96-98%.

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 наиболее тесные корреляционные связи существуют между ними и освещенностью (ФАР), температурой воздуха (T_v) и дефицитом влажности воздуха (ДДВП).

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

Список литературы

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. Генкель П.А. Физиология жаро- и засухоустойчивости растений. – М.: Наука, 1982. – 280 с.
3. 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.
4. Дроздов С.Н. 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.
5. Дроздов С.Н. Некоторые аспекты экологической физиологии растений. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2003. – 172 с.
6. Ильницкий О.А., Плугатарь Ю.В., Корсакова С.П. Методология, приборная база и практика проведения фитомониторинга. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. – 233 с.
7. Кайбеййнен Э.Л. Оптимизация фотосинтеза и транспирации у неотделенных листьев ивы на плантациях быстрого возобновления // Физиология растений. – 2007. – Т. 54. – С. 350-355.
8. 15. Кайбеййнен Э.Л. Параметры световой кривой фотосинтеза у *Salix dasyclados* и их изменение в ходе вегетации // Физиология растений. – 2009. – №. 56(4). – Р. 490-499.
9. Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли, грибы / отв. ред. Д.б.н. проф. Ена А.В., к.б.н. Фатерыга А.В. – Симферополь: ООО «ИТ «АРИАЛ», 2015. – 480 с.
10. Ларина Т.Г. О структуре фитоценозов формации *Juniperus excelsa* M. Bieb. в Горном Крыму // Экология. – 1980. – № 4. – С. 38-44.
11. Чернявская И.В., Толстикова Т.Н., Еднич Е.М. Представители рода *Juniperus Excelsa* L. в Ботаническом саду Адыгейского государственного университета. – Научный журнал «Вестник АГУ». – 2015. – Вып. 4 (171). – С.79-86.

12. Giorgi F., Lionello P. Climate change projections for the Mediterranean region // Glob Planet Change. – 2008. – Vol. 63. – P. 90-104. DOI:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005
13. Gülcü S., Gültekin H.C., Çelik S., Eser Y., Gürlevik N. The effects of different pot length and growing media on seedling quality of Crimean juniper (*Juniperus excelsa* M. Bieb) // African Journal of Biotechnology. – 2010. – Vol. 9(14). – P. 2101-2107.
14. 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. – No. 3. – P. 171-190
15. 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.
16. Meletiyou-Christou M.S., Rhizopoulou S. Leaf functional traits of four evergreen species growing in Mediterranean environmental conditions // Acta Physiol. Plant. – 2017. – V. 39. – No. 1. – P. 34-46. DOI: 10.1007/s11738-016-2330-4.
17. 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. – P. 97-100.
18. Larcher W. Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. – 506 p.
19. 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
20. Medrano H.J.M., Escalona J.M., Bota J., Gulias J., Flexas J. Regulation of Photosynthesis of C3 Plants in Response to Progressive Drought: Stomatal Conductance as a Reference Parameter. // Annals of Botany. – 2002. – Vol. 89. – P. 895-905.
21. Aylin Güney, Roman Zweifel, Semra Türkan, Reiner Zimmermann et al 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. – [Электронный ресурс] – URL: <https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-020-01007-2>
22. Mohamed A. B. Abdallah, Nicole Durfee Water Use and Soil Moisture Relationships on Western Juniper Trees at Different Growth Stages // Water. – 2020. – Vol. 12. – 1596. – [Электронный ресурс] – URL: https://mdpi-res.com/d_attachment/water/water-12-01596/article_deploy/water-12-01596.pdf?version=1591263763

Статья поступила в редакцию 13.07.2022 г.

Ilitsky O.A., Pashtetsky A.V. Modeling of various life processes of *Juniperus excelsa* M. Bieb to determine optimal growing conditions in the conditions of the Southern Coast of the Crimea // Bull. of the State Nikita Botan. Gard. – 2022. – № 145. – P. 67-78.

To study the ecophysiological response of *Juniperus excelsa* M. Bieb to the impact of environmental factors during the growing season, a mathematical model of stepwise regression analysis was used. The intensity of assimilation (A) and transpiration (E) was used as dependent variables, the main environmental factors were independent variables. The proportion of variance in the dependent variable explained by the applied models is 96-98%. 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 particular region.

Key words: *Juniperus excelsa* M. Bieb.; mathematical model; water regime; forecast; optimal and marginal environmental conditions