

that the maximum levels of variability are characteristic of plants growing in multi-species ruderal communities. Minimal variability was found in species-poor ruderal communities, as well as with insignificant participation of the species in segetal habitats.

Key words: *invasive species; cenopopulation; Erigeron canadensis; morphometric parameters; variability; Crimean Peninsula*

УДК 582.923.5:58.032

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОДНОГО РЕЖИМА *ARBUTUS ANDRACHNE* L. ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ ВИДА

Андрей Владимирович Паштецкий, Олег Антонович Ильницкий

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

Изучение влияния факторов внешней среды на интенсивность транспирации (E) и устьичную проводимость (gs) *Arbutus andrachne* L. в период активной вегетации позволило определить ряд параметров, позволяющих построить математическую модель, выраженную в форме пошагового регрессионного анализа. Данный подход дает возможность всесторонне изучить адаптивность вида к ареалу произрастания и спрогнозировать поведение растений в различных условиях окружающей среды, а также разработать соответствующие стратегии управления ростом и развитием изучаемого растения. Для диагностики и оценки валидности построенных моделей были проанализированы метрики, применяемые в регрессионном и дисперсионном анализе данных. Разработанная модель показала высокие коэффициенты детерминации (для E = 0,9631 и для gs = 0,9644) и объясняют изменения зависимых переменных. Установлено, что между освещенностью (R = 0.8776, R = 0.7840), температурой воздуха (R = 0.8488, R = 0.6200) и почвы (R = 0.4142, R = 0.1483) существуют наиболее тесные корреляционные связи с E и gs. Доля дисперсии объясняемой применяемой моделью равна 96%. Моделирование влияния факторов внешней среды на транспирацию и устьичную проводимость *Arbutus andrachne* L. имеет практическое применение для оптимизации условий выращивания этого растения, а также для разработки адаптивных стратегий в связи с изменениями климата. При этом используя для построения модели основные факторы внешней среды и их динамику для конкретного региона можно прогнозировать развитие вида на перспективу.

Ключевые слова: *Arbutus andrachne* L.; математическая модель; прогноз; оптимальные и предельные условия окружающей среды

Введение

Эколого-физиологические адаптации, проявляемые редкими и охраняемыми видами, играют ключевую роль в их выживании, позволяя оптимизировать использование ресурсов и регулировать внутренние функции в ответ на динамичные условия окружающей среды. Исследования по определению этих адаптаций и изучению их механизма действия позволяют понять, какие изменения в окружающей среде могут негативно повлиять на виды и дают возможность разработать меры по сохранению популяций растений, что является актуальным, так как изучаемые особенности критически важны для поддержания гомеостаза и устойчивости популяций в условиях экологического стресса и антропогенного воздействия.

В контексте усиливающейся аридизации территории Южного берега Крыма, вышеуказанные исследования становятся особенно актуальными. Это связано с тем, что изменение климата [1, 2] может привести к ухудшению условий обитания для многих видов, и изучение их физиологических особенностей поможет предсказать эти изменения и принять меры по сохранению видов.

Формирование системы защиты, основанной на экологических критериях и направленной на восстановление и сохранение биоэкологического потенциала [3, 4],

является ключевым аспектом в стратегии защиты биоразнообразия и предполагает детальное изучение эколого-физиологических характеристик различных видов. Исследования этих характеристик позволяют не только выявить уникальные адаптации, которые способствуют выживанию видов в изменяющихся условиях, но и разработать целевые стратегии для их защиты и сохранения. Понимание уникальности каждого вида в контексте его адаптаций дает возможность создать более эффективные и точечные меры охраны, которые будут учитывать специфику взаимодействия организма с окружающей средой и его вклад в поддержание экосистемы.

Особое значение имеет изучение эколого-физиологических особенностей редких и охраняемых видов на Южном берегу Крыма (ЮБК). Этот регион, с его уникальными климатическими и географическими условиями, требует специфического подхода к охране биоразнообразия. Исследование адаптаций местных видов позволяет разрабатывать эффективные стратегии их защиты, учитывающие особенности взаимодействия с окружающей средой и вклад в экосистему. Таким образом, изучение этих характеристик является важным шагом для сохранения редких видов и поддержания биоразнообразия региона.

Южный берег Крыма расположен в зоне умеренно сухого субтропического климата, типичного для средиземноморского региона [17], характеризующегося полузасушливыми и засушливыми условиями в теплый период года. Сценарные прогнозы изменения климата выделяют Средиземноморский регион как один из потенциально наиболее уязвимых к экстремальным погодным условиям, особенно в контексте участвовавших и интенсифицированных засух.

Прогнозы климатических изменений показывают, что Средиземноморский регион будет одним из наиболее пострадавших регионов мира в связи с увеличением частоты и интенсивности засух. Ретроспективный анализ изменения климата выявил тенденцию к повышению среднегодовых температур и частоты летних засух [14], оказывающих деструктивное воздействие на жизнеспособность и продуктивность лесных экосистем [21]. Эти изменения несут в себе угрозу радикальных сдвигов в структуре и видовом разнообразии лесов. Анализ динамики ростовых характеристик и адаптивных реакций деревьев на новые климатические реалии открывает перспективы для прогнозирования будущего лесных сообществ, и позволяет определить, какие виды смогут приспособиться к условиям с повышенной температурой и дефициту воды [15, 17, 18], а также детализирует механизмы внешнего контроля водного режима растений. Проведенные исследования обеспечивают объективную оценку устойчивости лесов в более теплых и сухих условиях среды, которые предсказываются сценариями глобального потепления для исследуемого региона и являются основой для разработки стратегий по сохранению и устойчивому управлению лесными экосистемами.

Исследование автохтонных растений, адаптированных к уникальным условиям микроклимата региона, являются ключевым аспектом сохранения природного разнообразия и развития новых зеленых зон на Южном берегу Крыма [6]. Высокая адаптивность *Arbutus andrachne* L., аборигенного вида флоры Крыма, к разнообразным условиям окружающей среды, объясняет выбор данного растения в виде объекта исследований, направленных на понимание и сохранение природных экосистем ЮБК. Анализ механизмов выживания и адаптации этого вида в условиях меняющегося климата позволит разработать эффективные стратегии для защиты и восстановления природных ландшафтов региона.

В начале 20-го века было замечено, что земляничник мелкоплодный сталкивается с угрозой исчезновения, его популяции восстанавливаются лишь эпизодически, в особо благоприятные периоды [8]. Обширные исследования, посвященные *A. andrachne*, раскрыли множество аспектов его биологии: от условий обитания [9] до особенностей

роста и адаптивных возможностей [10]. Также были изучены дендрометрические параметры [11], процессы размножения и методы их оптимизации [12], а также эффективность транспирации и фотосинтетический потенциал листьев [7, 13].

В связи с этим целью данного исследования изучить влияние внешних факторов на физиологические процессы, такие как транспирация и устьичная проводимость, с дальнейшей разработкой предиктивных моделей для оценки адаптаций *A. andrachne* к изменениям гидротермических условий среды, что послужит основой для разработки стратегий по сохранению этого эндемика, способствующих укреплению биологического разнообразия региона.

Объекты и методы исследований

A. andrachne (земляничник мелкоплодный), семейства Вересковые (*Ericaceae*), реликт третичного периода, произрастающий в средиземноморском климате и адаптированный к засушливым условиям (гемиксерофит). Данный вид является гелиофитом и распространён в восточном Средиземноморье, Малой Азии, западном Закавказье и на южном берегу Крыма, где проходит северная граница его ареала в средиземноморском регионе. Растение характеризуется разветвленной кроной и густой листвой, обладающей кожистой структурой и овально-эллиптической формой, что снижает водопотери и защищает от солнечного излучения. Их размер (от 5 до 10 см) и очередное расположение способствуют эффективному распределению света и воздуха, обеспечивая адаптацию к экстремальным температурам и засухе.

Согласно фенологическим исследованиям *A. andrachne* фаза цветения наступает в апреле, тем не менее, при аномальных климатических условиях, характеризующихся повышенной температурой зимой, зафиксированы случаи преантезиса уже в конце февраля. Земляничник мелкоплодный обладает высокой устойчивостью к засухе, что обусловлено наличием длинной и разветвлённой корневой системы, а также летним листопадом. В период июня-июля происходит опадение листьев прошлого года, что снижает транспирацию и способствует сохранению влаги. В тот же период наблюдается эксфолиация красной коры, под которой располагается хлорофиллсодержащая зелёная кора, выполняющая частичные фотосинтетические функции. Цикл обновления коры земляничника мелкоплодного не только способствует выживанию растения в экстремальных условиях, но и является важной адаптивной стратегией, позволяющей растению развиваться в средиземноморском биоме. Растение является морозоустойчивым и выдерживает зимнее колебание температур до -17°C .

На территории полуострова растение локализуется в специфических биотопах, таких как прибрежные обрывы и скалистые склоны (350-400 метров над уровнем моря), что коррелирует с его экологическими требованиями, подчеркивая адаптивные механизмы *A. andrachne* и его роль в поддержании стабильности экосистемы через участие в почвообразовательных процессах и сохранении биоразнообразия региона [14].

Исследования проводились на участке «Лавровое» центрального отделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Никитский ботанический сад-Национальный научный центр» Российской академии наук (НБС) и фокусировались на анализе условий выращивания саженцев земляничника мелкоплодного возрастом 6–8 лет. Растения культивировались в специализированных сосудах объёмом 10-15 литров, заполненных темно-коричневой среднеглинистой почвой, с наименьшей влагоёмкостью (НВ) от 21,6% до 25,2% и характеризующейся влажностью завядания от 9,9% до 11,1%, что минимизирует стресс растений от недостатка воды. Эти параметры создают оптимальные условия для водного баланса растений в средиземноморском климате, способствуя созданию уникальной среды для

изучения адаптационных стратегий земляничника мелкоплодного, включая его способность к самосеву и выживанию в условиях засухи [15].

Эксперименты проводились в тепличных условиях в период активной вегетации *A. andrachne* (июнь–ноябрь 2019–2020 гг.).

Измерения метеорологических параметров проводились с помощью комплекса DWS-11z, в который входили пиранометр (Apogee Instruments, США), датчик температуры и влажности воздуха, осадкометр (Decagon Devices, США) и анемометр (Davis Instruments, США). Мониторинг температуры и влажности почвы на глубине 20 см осуществлялся при помощи автономных автоматических датчиков SMTE-3z (Bioinstruments S.R.L., Молдова). Анализ метеоданных и климатических изменений выполняли согласно агроклиматологическим методикам.

В ходе изучения адаптации растений к засухе, ирригация экспериментальных образцов прекращалась в фазу интенсивного роста, сразу после формирования первых молодых листьев, тогда как влажность почвы контрольной группы поддерживалась на уровне 60-90% от полевой влагоемкости (оптимальные условия увлажнения).

Измерения транспирации и устьичной проводимости листа проводились с помощью монитора фотосинтеза и транспирации RTM-48A («Bio Instruments SRL», Республика Молдова). Монитор имеет 4 входа для оригинальных автоматических самозажимных створчатых камер (LC-4B), с рабочей зоной 20 см², и работающих поочередно таким образом, что одна из камер створки одновременно закрывается (на 30 секунд), а все остальные остаются открытыми. Короткое время измерения обеспечивает минимальное нарушение естественного состояния листьев. Измерения проводились на молодых побегах, расположенных в верхней части растения, с интервалом в 15–20 минут и с трёхкратной повторяемостью.

При измерении скорости транспирации использовался показатель абсолютной концентрации водяного пара в воздухе, который рассчитывался в течение переходного периода между 20 и 30 секундами после закрытия камеры. Алгоритм расчета учитывает повышение влажности внутри камеры и, следовательно, позволяет определить начальную скорость транспирации при влажности окружающего воздуха. Для измерения устьичной проводимости листа используется камера LC-4B, оснащенная дополнительным датчиком температуры. Устьичная проводимость (gs) рассчитывалась как обратное значение диффузионного сопротивления устьиц, которое вычисляется на основе разницы абсолютной влажности воздуха внутри и снаружи листа и сопротивления водяному пару через пограничный слой (которое для камеры LC-4B равно 220 с/м) и устьица. Измерения температуры листа, проводимые датчиком LT-LC, позволяют рассчитать абсолютную влажность в подустыичных полостях [17].

Для оценки воздействия экологических факторов на водный обмен растений использовалась статистическая модель множественной регрессии. Модель, построенная в Statistica 10, учитывала внешние условия как независимые переменные. Адекватность модели проверялась через статистику «Итоговые потери», а точность — с помощью коэффициента детерминации (R^2), среднеквадратичным отклонением ошибок (RMSE) и общей суммой квадратов отклонений (SSE). Выбор наилучшей модели основывался на высоких значениях R^2 и низких RMSE и SSE. В регрессионных уравнениях интенсивность транспирации (E) и устьичная проводимость (gs) были зависимыми переменными, а фотосинтетическая активная радиация (I), температуры воздуха и почвы (Tв и Tп), влажность воздуха и почвы (Hв и Wп) – независимыми.

В модели регрессии коэффициенты были отобраны на основе их статистической значимости, согласно р-критерию Стьюдента ($p < 0,05$).

$$v_{21} = -b_0 + b_1 * v_{32} + b_2 * v_{33} - b_3 * v_{34} - b_4 * v_{36} + b_5 * v_{39},$$

где: v - порядковые номера соответствующих переменных в исследуемом наборе данных.

Используемая методика позволяет количественно оценить вклад каждого из факторов в изменение интенсивности транспирации и способствует более глубокому пониманию процессов, происходящих в растении, а также разработке стратегий для адаптации растений к меняющимся условиям окружающей среды.

Результаты исследований

В ходе ряда экспериментов было выполнено комплексное исследование фенотипических реакций *A. andrachne* на различные абиотические стрессоры. Полученные данные способствовали детализации экологической пластичности и физиологических адаптаций данного вида, а применение интегрированных фитомониторинговых систем с передовыми информационно-измерительными технологиями обеспечило количественную и качественную оценку витальности растения и его функционального состояния в контексте антропогенного пресса и природных биотических воздействий [18,19].

Для расчета зависимой переменной использовалась следующая формула:

$$E = -19,8941 + 0,0045 * I + 0,6384 * T_v - 0,0611 * H_v - 0,4781 * T_{п} + 0,9273 * W_{п}$$

Анализируя эффективность предложенной регрессионной модели, стоит отметить, что она демонстрирует высокую степень точности в прогнозировании. Совокупность эмпирических данных (таблицы 1–2), отраженных в высоком значении R^2 , сопровождающиеся низкими показателями ошибок RMSE и SSE, а также статистическая значимость регрессионных коэффициентов (с уровнем значимости $p < 0,05$ по t-критерию Стьюдента), подтверждает, что предложенная регрессионная модель является точным и надежным инструментом для прогнозирования значений зависимой переменной. Эти параметры свидетельствуют о валидности модели и её пригодности для использования в предсказательных целях.

Таблица 1

Результаты пошаговой регрессии зависимости интенсивности транспирации от изучаемых факторов внешней среды

Параметры	Значение
Множественный коэффициент корреляции (R)	0,9814
Множественный коэффициент детерминации (R^2)	0,9631
Скорректированный R^2	0,9615
F(5,782)	220,1473
p	0,00
Стандартная ошибка оценки	4,8115

*Примечание: F – критерий Фишера (N – объём выборки), p – вероятность результатов.

Из таблицы 1 видно, что множественный коэффициент детерминации (R^2) равен 0,9631 – это означает, что около 96,31% изменчивости зависимой переменной может быть объяснено моделью. Это указывает на высокую степень соответствия между наблюдаемыми и предсказанными значениями, а показатель скорректированного коэффициента детерминации указывает на адекватную корректировку модели на количество предикторов. Высокое значение множественного коэффициента корреляции ($R=0,9814$), указывает на очень сильную линейную зависимость между предикторами и зависимой переменной, при этом статистическая значимость модели в целом подтверждается критерием Фишера ($F(5,782) = 220,1473$, при $p = 0,00$).

Данные дисперсионного анализа (табл. 2) показывают, что модель регрессии значимо объясняет вариацию экспериментальных данных. Сумма квадратов ошибок для регрессии (30580,26) и остатков (18104,37) показывает, как велика разница между

фактическими значениями и значениями, предсказанными моделью. Средне-квадратичная ошибка также составила 30580,26, что подтверждает хорошее соответствие модели экспериментальным данным. Значение F- статистики равно 220,1473, а значение Р равно 0,00, что вероятность случайного получения таких результатов крайне мала, это свидетельствует о высокой статистической значимости модели в целом и подтверждает, что выбранная модель адекватно описывает зависимость между переменными.

Исходя из проведённого анализа, можно сделать вывод, что экзогенные переменные (факторы окружающей среды) оказывают существенное воздействие на исследуемый показатель (интенсивность транспирации). Применение разработанной математической модели позволяет с высокой долей вероятности прогнозировать будущие значения данной переменной.

Таблица 2

Результаты дисперсионного анализа зависимости экспериментальных и моделируемых данных

	Сумма квадратов ошибок	Средне – квадратичная ошибка	F	p
Регрессия	30580,26	30580,26	220,1473	0,00
Остатки	18104,37	18104,37		
Итого	48684,63	48684,63		

*Примечание: F – критерий Фишера, p – вероятность результатов.

Для апробации модели и оценки ее прогностической способности в ходе исследования проводили анализ расхождений между фактическими экспериментальными результатами и предсказаниями, сделанными на основе модели. Такой подход позволил определить степень соответствия модели реальным условиям и её способность к точному воспроизведению данных. В таблице 3 представлены наблюдаемые и предсказанные значения, а также остатки, которые являются разностью между ними. Среднее значение остатков равно нулю говорит о том, что модель не имеет систематической ошибки и хорошо справляется с предсказаниями в среднем. Однако, минимальные и максимальные значения остатков показывают, что в отдельных случаях могут быть значительные отклонения, которые стоит дополнительно проанализировать для улучшения модели.

Таблица 3

Наблюдаемые и предсказанные значения и остатки для зависимой переменной E

	Наблюдаемые значения	Предсказанные значения	Остатки	Стандартные предсказанные значения	Стандартные Остатки
Минимум	0,0000	0,0023	-15,589	-1,2845	-3,2400
Максимум	70,4620	51,0856	28,018	15,0664	5,8231
Среднее	6,9996	6,9996	0,000	0,0000	0,0000
Медиана	4,4000	5,6710	-0,635	-0,2132	-0,1320

Результаты таблицы 3 подтверждают, что модель обладает высокой точностью, так как средние значения разности между наблюдаемыми и предсказанными значениями (остатки) равны нулю, распределение стандартных предсказанных значений и стандартных остатков показывает, что отклонения от модели в основном находятся в пределах разумных границ, при этом несмотря на наличие отдельных значительных отклонений (максимальные и минимальные остатки), в целом, остатки не демонстрируют систематических ошибок, что подтверждает адекватность модели. Все это свидетельствует о том, что модель эффективно предсказывает значения зависимой переменной (E), но также необходимо учитывать возможность наличия выбросов, которые могут потребовать дополнительного изучения и корректировки модели.

В частности, для переменной ФАР (I) центральное положение занимает значение медианы, равное 187, что свидетельствует о равномерном распределении данных вокруг этой отметки. Квартили, расположенные на уровнях 20 (25%) и 673 (75%), указывают на асимметрию распределения. Экстремальные значения, с одной стороны минимум в 16, а с другой — максимум в 1492, подчеркивают широкий диапазон изменчивости ФАР (I).

На представленном боксплоте (Рис. 1) наглядно демонстрируются ключевые статистические характеристики для независимых переменных, включенных в аналитическое уравнение. Анализ результатов исследования позволил выявить, что фотосинтетически активная радиация имеет наибольшее влияние на интенсивность транспирации, что логично, учитывая её основную роль в процессе фотосинтеза. Также было обнаружено, что температура воздуха и влажность воздуха оказывают значительное влияние на этот процесс, в то время как параметры почвы — незначительный эффект.

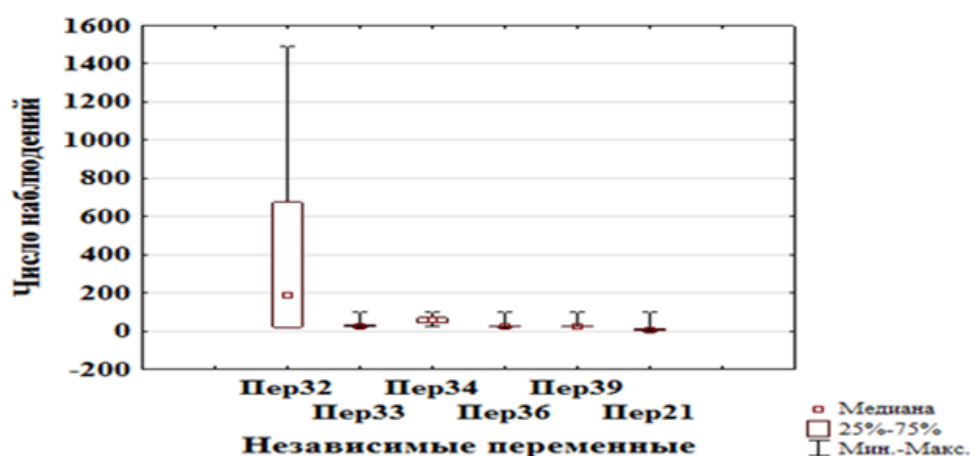


Рис. 1 Диаграмма размаха независимых переменных в уравнении
Примечание: Пер32 – I, Пер33 – Тв, Пер34 – Нв, Пер36 – Тп, Пер39 – Wп, Пер21 – E

Модель, в которой 96% вариации зависимой переменной находит своё объяснение, демонстрирует высокую степень точности и может быть использована для прогнозирования значений зависимой переменной на основе независимых переменных, включенных в уравнение. Таким образом, данная математическая модель позволяет точно оценить влияние основных факторов внешней среды на интенсивность водного режима в процессе активного роста *A. andrachne*.

В качестве другой зависимой переменной была взята устьичная проводимость (g_s , мм/с), представляющая собой физиологический параметр, который квантифицирует регуляцию газообмена и транспирационного потока водяного пара через устьичные аппараты растений. Этот показатель имеет прямую корреляцию с фотосинтетическими процессами, так как устьица выполняют функцию вентиляционных порталов для ассимиляции углекислого газа, необходимого для фотосинтеза, и одновременно контролируют потери воды на уровне транспирации.

Функциональная зависимость устьичной проводимости от экологических параметров, таких как фотосинтетически активная радиация ФАР (I, $\mu\text{моль/м}^2\text{с}$), температура окружающего воздуха (Тв, °C), относительная влажность воздуха (Нв, %), температура почвы (Тп, %) и дефицит влажности воздуха (Дв, кПа), позволяет

моделировать физиологические реакции растений на изменения внешней среды. Это моделирование осуществляется с помощью множественного регрессионного анализа, где коэффициенты регрессии отражают степень влияния каждого из этих факторов на устьичную проводимость, расчет её зависимости от абиотических факторов имеет ключевое значение для оптимизации условий выращивания растений и их адаптации к климатическим изменениям, при этом использовалась следующая формула, где индексом v обозначались номера переменных:

$$v_8 = -b_1 \cdot v_{32} + b_2 \cdot v_{33} + b_3 \cdot v_{34} - b_4 \cdot v_{36} + b_5 \cdot v_{43}$$

Уравнение множественной регрессии для устьичной проводимости (g_s) представлено в следующем виде:

$$g_s = -0,00065 \cdot I + 0,26280 \cdot T_v + 0,05383 \cdot H_v - 0,27378 \cdot T_{\Pi} + 1,06881 \cdot D_v$$

Анализ точности аппроксимации модели множественной регрессии для оценки устьичной проводимости (g_s) *A. andrachne*, так же проводился согласно оценке трех ключевых показателей эффективности (таблицы 4–5): коэффициента детерминации (R^2), корня из среднеквадратичной ошибки (RMSE) и суммы квадратов ошибок (SSE).

Статистическая обработка данных показала, что модель обладает высокой степенью точности. Коэффициент детерминации (R^2) составил 0,9644 (табл. 4), что указывает на то, что модель объясняет 96,44% вариации зависимой переменной (g_s).

Таблица 4

Результаты пошаговой регрессии зависимости устьичной проводимости от факторов внешней среды

Параметры	Значение
Множественный коэффициент корреляции (R)	0,9882
Множественный коэффициент детерминации (R^2)	0,9644
Скорректированный R^2	0,8076
F(5,782)	604,75
p	0,00
Стандартная ошибка оценки	1,7217

*Примечание: F – критерий Фишера (N – объём выборки), p – вероятность результатов.

Значение RMSE и SSE оказались низкими (табл. 5), что свидетельствует о малом количестве ошибок при прогнозировании значений g_s . Уровень значимости критерия Стьюдента для всех коэффициентов регрессии не превышал 0,05, что подтверждает статистическую значимость модели.

Таблица 5

Результаты дисперсионного анализа зависимости экспериментальных и модельных данных для g_s

	Сумма квадратов ошибок	Средне – квадратичная ошибка	F	p-знач.
Регрессия	10756,10	1792,684	604,7575	0,00
Остатки	2540,41	2,964		
Итого	13296,51			

*Примечание: F – критерий Фишера, p – вероятность результатов.

Верификация модели, представленная в таблице 6, иллюстрирует дисперсию — различия между наблюдаемыми значениями и прогнозами модели. Эти дисперсии, или резидуалы, отражают точность предсказательной способности модели.

В анализируемой модели (табл. 6) среднее значение резидуалов составляет ноль, что свидетельствует об отсутствии систематической погрешности в прогнозах модели, а так же о ее высокой точности, подтверждая тем самым обоснованность выбранной

регрессионной модели для оценки устьичной проводимости у земляничника мелкоплодного в зависимости от изучаемых абиотических факторов внешней среды.

Диаграмма размаха, представленная на рисунке 2, иллюстрирует распределение значений независимых переменных, используемых в уравнении.

Таблица 6

Наблюдаемые и предсказанные значения и остатки для зависимой переменной g_s

	Наблюдаемые значения	Предсказанные значения	Остатки	Стандартные предсказанные значения	Стандартные Остатки
Минимум	0,0000	-0,8911	-3,1455	-1,2845	-3,2400
Максимум	8,1200	2,5322	19,0502	15,0664	5,8231
Среднее	1,5575	1,5575	0,00000	0,0000	0,0000
Медиана	0,9800	1,2626	-0,2440	-0,2132	-0,1320

Для переменной ФАР (I), которая отражает фотосинтетически активную радиацию, описательные статистики имеют следующие значения: медиана = 152,5 – центральное значение, разделяющее данные пополам, указывая на среднюю интенсивность ФАР (I); квартиль 75% = 650,5 – значение, ниже которого находится 75% всех данных, что указывает на верхний предел значений; 25% = 20 – значение, ниже которого находится 25% всех данных, указывая на нижний предел значений; максимум = 1492 – наибольшее зафиксированное значение фотосинтетически активной радиации; минимум = 15 – наименьшее зафиксированное значение ФАР (I). Максимальные и минимальные значения дают представление о предельных условиях, в которых измерялись эти переменные. Для остальных независимых переменных эти значения определяются таким же способом.

Такой анализ позволяет сделать вывод о том, что модель включает независимые переменные с широким диапазоном значений, что помогает обеспечить точность и надежность расчетов устьичной проводимости (g_s) в различных условиях среды.

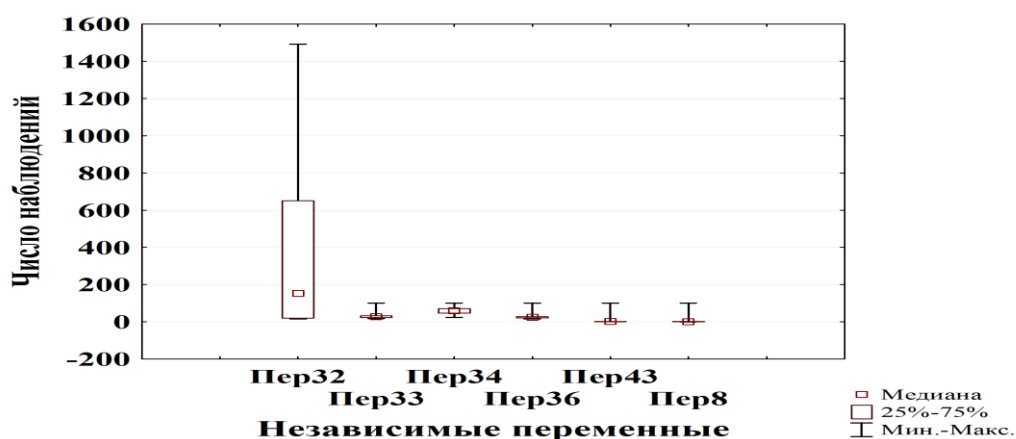


Рис. 2 Диаграмма размаха независимых переменных в уравнении

Примечание: Пер32 – I, Пер33 – Тв, Пер34 – Нв, Пер36 – Тп, Пер43 – Дв, Пер8 – g_s

Высокая доля объясненной дисперсии (96%) свидетельствует о том, что модель обладает высокой точностью и эффективно объясняет влияние независимых переменных на устьичную проводимость. Это подтверждает надежность модели и её способность адекватно описывать реальные процессы, происходящие в растениях под воздействием различных факторов внешней среды. Таким образом, данная модель является инструментом для прогнозирования устьичной проводимости и может быть использована для оценки состояния растений в различных климатических условиях, а

также для разработки стратегий управления водным режимом и оптимизации условий выращивания.

В таблице 7 приведены коэффициенты корреляции между независимыми (I, Tв, Нв, Тп, Wп, Dв) и зависимыми (E, gs) переменными.

Таблица 7

Коэффициенты корреляции между независимыми и зависимыми переменными						
Переменные	Независимые переменные					
	I	Tв	Нв	Тп	Wп	Dв
Зависимые переменные:						
E, мг/м ² ·с	0,8776	0,8488	-0,6537	0,4142	0,30254	
gs, мм/с	0,7840	0,6200	-0,2562	0,1483		0,35206

Из таблицы 7 видно, что зависимые переменные (E и gs) имеют значительные положительные корреляционные связи с фотосинтетически активной радиацией (I) и температурой воздуха (Tв), а также отрицательную корреляцию с относительной влажностью воздуха (Нв). Интенсивность транспирации (E) наиболее сильно коррелирует с ФАР (I) (0,8776) и температурой воздуха (0,8488), что указывает на важность этих факторов для активности транспирации и означает, что с увеличением интенсивности света и повышением температуры, как правило, ускоряются метаболические процессы, а соответственно значительно возрастает и интенсивность транспирации. Устьичная проводимость (gs) также показывает высокую положительную корреляцию с ФАР (0,7840) и температурой воздуха (0,6200), а также умеренную положительную корреляцию с дефицитом влажности воздуха (Dв) (0,35206), что свидетельствует о влиянии этих факторов на процессы газо- и водного обмена.

В то же время, обе зависимые переменные (E и gs) демонстрируют отрицательную корреляцию с относительной влажностью воздуха (Нв), что означает, что увеличение влажности приводит к снижению интенсивности транспирации и устьичной проводимости. Эти результаты подчеркивают значительное влияние климатических факторов на физиологические процессы земляничника мелкоплодного. Кроме того, модели, используемые для анализа этих связей, показали высокую степень точности (96%), что делает их надежным инструментом для предсказания изменений в физиологических процессах *A. andrachne* в ответ на колебания внешних факторов.

Экспериментальный набор данных, полученный в контролируемых условиях, способствовал идентификации факторов, которые влияют на фенотипические проявления изучаемого вида. Фитофизиологические параметры, квантифицированные с помощью математической модели, коррелирующей физиологические реакции с абиотическими и биотическими переменными среды, позволяют прогнозировать потенциальную активность биопроцессов, определить диапазон экологического оптимума, а также оценить возможности физиологической адаптации к лимитирующим условиям. Эти данные имеют значительную ценность для фенотипической диагностики и оценки адаптивных характеристик различных генотипов [20]. Результаты проведенных исследований являются источником значимых сведений о параметрах фотосинтетической активности, водного обмена, резистентности к аридным условиям, тенеадаптации, а также о закономерностях онтогенеза и морфогенеза растений. Эти данные способствуют углубленному пониманию эколого-физиологических аспектов жизнедеятельности флоры, что имеет решающее значение для оптимизации процессов культивирования и адаптации растений к условиям экосистемы Южного берега Крыма [21].

Выводы

Исследование экофизиологических адаптаций *A. andrachne* к факторам внешней среды в период активного роста позволило разработать предиктивные модели, выраженных в форме математических уравнений, основанных на методологии пошаговой регрессии. Эмпирические значения коэффициента детерминации для интенсивности транспирации ($E - R^2=0,9631$) и устьичной проводимости ($g_s - R^2=0,9644$), в сочетании с минимальными величинами RMSE и SSE, а также статистическая значимость, подтверждаемая t-критерием Стьюдента ($p<0,05$), свидетельствуют о высокой предсказательной точности и надёжности модели, что так же подтверждается высокой долей дисперсии зависимых переменных, объясняемой моделью (96%).

Корреляционный анализ выявил, что интенсивность транспирации и устьичная проводимость имеют положительную зависимость с освещенностью ($E - 0,8776$; $g_s - 0,7840$) и температурой воздуха ($E - 0,8488$; $g_s - 0,6200$), что указывает на их усиление при повышении уровня фотосинтетической активной радиации и температуры. В то же время, наблюдается отрицательная корреляция с относительной влажностью воздуха ($E - -0,6537$; $g_s - -0,2562$), что свидетельствует о снижении данных показателей в более влажных условиях. Эти результаты подчеркивают значительное влияние внешних факторов на физиологические процессы в растениях.

Практическое применение разработанной модели включает оптимизацию условий выращивания растений, прогнозирование ответа растений на изменения климата и дает возможность разработать стратегию адаптации их к изменяющейся среде в различных климатических условиях.

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. Гиль А.Т., Ильницкий О.А. Зависимость интенсивности видимого фотосинтеза, температуры и транспирации листа *Arbutus andrachne* L. от некоторых факторов внешней среды // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2019. – № 133. – С. 42-50. DOI: 10.36305/0513-1634-2019-133-42-50
3. Губанова Т.Б. Оценка состояния растений *Arbutus andrachne* L. на территории природного заповедника "Мыс Мартыан" и арборетума Никитского ботанического сада после неблагоприятных зимних условий 2011-2012 гг. // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартыан». – 2013. – № 4. – С. 121.
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., Гиль А. Т., Паштецкий А. В. Особенности роста *Arbutus andrachne* L. в условиях полевого вегетационного опыта Южного берега // Plant Biology and Horticulture: theory, innovation. – 2020. – №. 4(157). – С. 135-143. DOI: 10.36305/2712-7788-2020-4-157-135-143 Ильницкий О.А., Плугатарь Ю.В., Корсакова С.П. Методология, приборная база и практика проведения фитомониторинга. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. – 233 с.
7. Исигов В.П., Плугатарь Ю.В. Дикорастущие деревья и кустарники Крыма. 2-е изд., испр. и доп. – Симферополь: ИТ «Ариал», 2018. – 324 с.

8. Коба В.П., Пательбу В.В., Сахно Т.М. Состояние и дендрометрические характеристики молодых растений *Arbutus andrachne* L. заповедника "Мыс Мартыан". // Вестник Нижневартковского государственного университета. – 2018. – № 3. – С. 42-46.
9. Плугатарь Ю.В., Корсакова С.П., Ковалев М.С. Сравнительная оценка CO₂/H₂O-газообмена вечнозеленых древесно-кустарниковых растений в благоприятных и стрессовых условиях внешней среды // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2020. – № 135. – С. 9-23. DOI: 10.36305/0513-1634-2020-135-9-23
10. Плугатарь Ю.В., Корсакова С.П., Ильницкий О.А. Экологический мониторинг Южного берега Крыма. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. – 162 с.
11. Фалькова Т.В., Галушко Р.В., Лицук А.И., Захаренко Г.С., Крайнюк Е.С. Пластичность *Arbutus andrachne* (Ericaceae) в условиях засухи на Южном берегу Крыма. // Украинский ботанический журнал. – 2001. – Т. 58. – № 6. – С. 700-706.
12. Шевченко С.В. Особенности репродуктивных процессов некоторых редких видов флоры Крыма / под редакцией С.Ф. Котова // В сборнике: Актуальные проблемы ботаники и охраны природы. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора Г.Ф. Морозова. – 2017. – С. 320-330
13. Эггерс Е.В. Земляничное дерево в Крыму // Бюллетень Никитского ботанического сада, 1934. – №14. – С. 338.
14. Anderegg WRL, Schwalm C, Biondi F, Camarero JJ, Koch G, Litvak M, Ogle K, Shaw JD, Shevliakova E, Williams AP, Wolf A, Ziaco E, Pacala S Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models // Science. – 2015. – Vol. 349. – P. 528-532. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aab1833>
15. Tognetti R, Lasserre B, Di Febbraro M, Marchetti M Modeling regional drought-stress indices for beech forests in Mediterranean mountains based on tree-ring data // Agric For Meteorol. – 2019. – Vol. 265. – P. 110-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.015>
16. Koerner C., Sarris D., Christodoulakis D. Long-term increase in climatic dryness in the East-Mediterranean as evidenced for the island of Samos. – Reg Environ Change, 200. – Vol. 5. – P. 27-36.
17. Karam F., Doulis A., Ozturk M., Dogan Y., Sakcali S. Eco-physiological behaviour of two woody oak species to combat desertification in the east Mediterranean-a case study from Lebanon. – Procedia Social and Behavioral Sciences. – 2011. – Vol. 19. – p. 787-796.
18. Plugatar Y.V., Klymenko Z.K., Ulanovskaya I.V., Zykova V.K., Plugatar S.A. Prospects for the use of the Crimean flora resources in the floriculture // Acta Horticulturae. – 2019. – Vol. 1240. – P. 65-68.
19. Miquel Nadal, Margalida Roig-Oliver, Josefina Bota, Jaume Flexas Leaf age-dependent elastic adjustment and photosynthetic performance under drought stress in *Arbutus unedo* seedlings // Flora Volume 271, October 2020, 151662. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151662>
20. Wickens G.E. Ecophysiology of economic plants in arid and semi-arid lands / Gerald E. Wickens. – 1998. – 348 p.

Статья поступила в редакцию 10. 06. 2024 г.

Pashtetsky A.V., Ilitsky O.A. Modeling of water regime features of *Arbutus andrachne* L. to determine optimum growth conditions of the species // Bull. of the State Nikita Botan. Gard. – 2024. – № 151. – P. 132-144

The study of the influence of environmental factors on the intensity of transpiration (E) and stomatal conductance (gs) of *Arbutus andrachne* L. during the active growing season made it possible to determine a number of parameters that make it possible to construct a mathematical model expressed in the form of step-by-step regression analysis. This approach makes it possible to comprehensively study the adaptability of a species to

its growing area and predict the behavior of plants in various environmental conditions, as well as develop appropriate strategies for controlling the growth and development of the plant under study. To diagnose and assess the validity of the constructed models, the metrics used in regression and variance analysis of data were analyzed. The developed model showed high coefficients of determination (for $E = 0.9631$ and for $g_s = 0.9644$) and explained changes in the dependent variables. It has been established that the closest correlations with E and g_s exist between illumination ($R = 0.8776$, $R = 0.7840$), air temperature ($R = 0.8488$, $R = 0.6200$) and soil temperature ($R = 0.4142$, $R = 0.1483$). The proportion of variance explained by the applied model is 96%. Modeling the influence of environmental factors on transpiration and stomatal conductance of *Arbutus andrachne* L. has practical applications for optimizing the growing conditions of this plant, as well as for developing adaptive strategies in connection with climate change. At the same time, using the main environmental factors and their dynamics for a specific region to build a model, it is possible to predict the development of the species in the future.

Key words: *Arbutus andrachne* L.; mathematical model; forecast; optimal and limiting environmental conditions