

Перспективы разработки математических моделей прогнозирования продукционных процессов в виноградарстве

Иванова М.И.^{1✉}, Иванченко В.И.², Потанин Д.В.²

¹Центр агрохимической службы «Крымский», г. Симферополь, Республика Крым, Россия;

²Агротехнологическая академия ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», г. Симферополь, Республика Крым, Россия.

✉imi_2712@mail.ru

Аннотация. Установлено, что для внедрения цифровизации в отрасль виноградарства необходимо применять методы математического моделирования с использованием множественного регрессионного анализа на основе создания баз данных, полученных как на опытных участках, так и результатов наблюдений за продуктивностью промышленных насаждений. Целью исследований являлось рассмотрение путей создания устойчивых цифровых моделей, объясняющих влияние отдельных абиотических, биотических факторов окружающей среды, антропогенного воздействия, а также их комплексного взаимодействия на продуктивность виноградных растений, их промышленных насаждений и качества производимой продукции с учётом экологической пластичности подвойных и привойных сортов, а также подвойно-привойных комбинаций. В работе определены направления и методологические подходы комплексного изучения влияния почвенных, климатических, биотических и технологических особенностей производства виноградовинодельческой продукции на урожайность насаждений и товарные качества. Установлена принципиальная возможность использования непараметрических данных как элементов сортовой принадлежности подвойно-привойных комбинаций в многофакторной регрессионной модели для характеристики выхода стандартных привитых черенков с тесной связью множественной корреляции ($r=0,6969$). На основе регрессионной модели показан методологический подход разработки цифрового двойника отдельного сорта винограда (Каберне Совиньон) при изучении технологических качеств лозы. Подобная методология может применяться как для решения научных вопросов, так и в виде интегральной характеристики, использоваться для текущего прогноза качественных характеристик (с достоверностью $r=0,9866$). Показаны перспективные направления для дальнейших исследований в сфере цифровизации отрасли виноградарства с учётом последующего внедрения результатов исследований, как комплексных прогнозных моделей, в производство.

Ключевые слова: виноградарство; цифровизация; технология выращивания; прогнозирование; продуктивность; эффективность производства.

Для цитирования: Иванова М.И., Иванченко В.И., Потанин Д.В. Перспективы разработки математических моделей прогнозирования продукционных процессов в виноградарстве // «Магарач». Виноградарство и виноделие. 2024;26(3):235-241. EDN DXYZSK.

Prospects for the development of mathematical models to forecast the production processes in viticulture

Ivanova M.I.^{1✉}, Ivanchenko V.I.², Potanin D.V.²

¹Center of Agrochemical Service "Krymskiy", Simferopol, Republic of Crimea, Russia;

²Agrotechnological Academy of the FSAEI HE "V.I. Vernadsky Crimean Federal University", Simferopol, Republic of Crimea, Russia.

✉imi_2712@mail.ru

Abstract. It is established that in order to introduce digitalization into the viticulture industry, it is necessary to apply mathematical modeling methods using multiple regression analysis based on the creation of databases obtained at experimental sites, and observation results of the productivity of industrial plantations. The goal of research was to consider ways to create sustainable digital models explaining the influence of individual abiotic and biotic environmental factors, anthropogenic impact, as well as their complex interaction on the productivity of grape plants, their industrial plantations and the quality of products, taking into account ecological plasticity of rootstock and graft varieties, as well as rootstock-graft combinations. The work defines the directions and methodological approaches for a comprehensive study of the influence of soil, climatic, biotic and technological features of grape-growing and wine production on the cropping capacity of plantations and marketable qualities. The principal possibility of using nonparametric data as elements of varietal affiliation of rootstock-graft combinations in a multifactorial regression model to characterize the yield of standard grafted cuttings with a close relationship of multiple correlation ($r=0.6969$) was established. Based on the regression model, a methodological approach to the development of a digital twin of a separate grape variety ('Cabernet Sauvignon') is shown when studying the technological qualities of the vine. Such a methodology can be used both to solve scientific issues, and in the form of an integral characteristic, used for the current forecast of qualitative characteristics (with confidence $r=0.9866$). Promising directions for further research in the field of digitalization of viticulture industry are shown, taking into account the subsequent implementation of research results as complex predictive models into production.

Key words: viticulture; digitalization; cultivation technology; forecasting; productivity; production efficiency.

For citation: Ivanova M.I., Ivanchenko V.I., Potanin D.V. Prospects for the development of mathematical models to forecast the production processes in viticulture. Magarach. Viticulture and Winemaking. 2024;26(3):235-241. EDN DXYZSK (in Russian).

Введение

Сельское хозяйство является важным элементом народного хозяйства, обеспечивающее население продуктами питания, а промышленность – сырьём. Однако, в отличие от других отраслей, оно подвержено внешним, пока слабо контролируемым факторам как абиотического, так и биотического характера, что сказывается на продуктивности насаждений и объёмах производства продукции [1–3]. Особо остро данная проблема стоит в современный период под влиянием глобального изменения климата [4, 5]. При этом всё более актуальным становится вопрос прогнозирования ответа растений на подобное воздействие, способное привести к снижению урожайности или качеству производимой продукции. С применением современной вычислительной техники, а также накопленного учёными экспериментального материала по влиянию факторов внешней среды на растения можно разрабатывать математические алгоритмы, обеспечивающие достаточно точный уровень прогнозности продуктивности насаждений в конкретных условиях выращивания [6–8].

В 2021 г. распоряжением Правительства Российской Федерации № 3971-р от 29 декабря «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отраслей агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ на период до 2030 г.» в общих положениях отмечена необходимость обеспечения ускоренного развития цифровых технологий. В частности, планируется активно развивать и внедрять во все подотрасли моделирование и прогнозирование процессов производства, создание цифровых двойников сортов и отдельных растений, что включает сбор и обработку больших массивов данных как о самих растениях, так и об окружающей среде их места выращивания.

В целом современное сельское хозяйство, как и наиболее активно развивающаяся его подотрасль – виноградарство, относительно слабо развиты с точки зрения внедрения элементов цифровизации в промышленное производство [9–11]. Это приводит к тому, что объёмы производства и качество виноградовинодельческой продукции значительно зависят от условий года и почвы зоны выращивания [12–14]. Данное явление ограничивает возможности получения сырья и ягод с контролируемыми параметрами, пригодными к переработке и потреблению в любое время или год. Чтобы минимизировать влияние абиотических факторов на урожай, необходимо провести комплекс исследований по разработке устойчивых моделей их влияния на конкретные сорта с точки зрения продуктивности насаждений и качества продукции [15, 16]. В современном научном процессе решение данной глобальной задачи носит, как правило, единичный характер и только начинает развиваться в узком направлении. Исследования по созданию моделей ведутся отдельно по влиянию концентраций подвижных элементов питания в почве, параметров климатических факторов по отдельности (интенсивность морозов, теплообеспеченность территории, водный

режим и др.) на продуктивность насаждений винограда [2, 5, 17]. Однако, единых моделей, в которых могут быть отображены комплексные взаимодействия факторов и их влияние на прогнозируемость урожая винограда практически не разработано. В отечественном садоводстве и виноградарстве подобная работа ведётся Маморштейн А.А., Слинко О.В. и др. [11, 18]. В большинстве случаев проблема разработки устойчивых моделей, показывающих прогнозное поведение растений даже на уровне культуры, не говоря уже о группах сортов или отдельных сортов в зависимости от почвенно-климатических условий, ограничено отсутствием установленного и стандартизированного математического аппарата, пригодного к соответствующим вычислениям, которые для увеличения точности ожидаемых результатов требуют работы с большим массивом данных.

Также на сегодня нет математических моделей поведения сортов по группам устойчивости к основным болезням винограда, в зависимости от развития инфекции [19]. Причем сами прогнозные модели развития грибов, вызывающих милдью, оидиум и др. в зависимости от температурных и влажностных условий окружающей среды, уже разработаны достаточно давно и внедряются в мониторинговые программные комплексы метеостанций [1, 6, 9].

Подобные исследования должны носить системный характер и включать в себя настолько большой массив данных, что не могут быть обработаны общепринятыми в сельскохозяйственной науке дисперсионными и вариационными анализами результатов исследований в ограниченных экспериментальными участками условиях [6, 8, 14]. Единственным верным способом может считаться разработка математических моделей на основе многофакторного регрессионного, кросскорреляционного анализов с выделением приоритетных для производства факторов, наблюдаемых в течении продолжительного периода времени [2, 12].

Таким образом, необходимо разработать новые методологические подходы сбора и обработки информации по результатам наблюдений в промышленных виноградниках и опытных участках с применением многофакторных расчётов для получения математических моделей поведения сортов, подвойно-привойных комбинаций, подверженных влиянию абиотических и биотических факторов окружающей среды [20, 21].

Целью перспективных исследований являлось рассмотрение путей создания устойчивых цифровых моделей, объясняющих влияние отдельных абиотических, биотических факторов окружающей среды, антропогенного воздействия, а также их комплексного взаимодействия на продуктивность виноградных растений, их промышленных насаждений и качества производимой продукции с учётом экологической пластичности подвойных и привойных сортов, а также подвойно-привойных комбинаций.

Материалы и методы исследования

Рабочая гипотеза. Виноградное растение как био-

тический элемент существует и развивается в среде под воздействием внешних абиотических факторов (почвенные для корневой системы и климатические условия для надземной (в том числе продукционной) части растений). Влияние этих факторов носит индивидуальный (частный) характер, который отображается показателями минимума, оптимума, избыточного и подавляюще избыточного воздействия на растения. Также в виде взаимодействия комплекса факторов их влияние может быть положительным или отрицательным на рост и продуктивность винограда как репродукционной системы. Эти процессы как индивидуального влияния, так и комплексного взаимодействия на сегодня могут быть изучены с применением комплекса, имеющегося в наличии исследователей математического аппарата. Для этого необходимо применение методов обработки больших массивов данных, собираемых как на исследовательских виноградниках, так и производственных участках.

В качестве объектов исследований выступают:

- почвенные условия, объективно сложившиеся на территории виноградных насаждений, переведённые в цифровую форму;

- климатические условия Республики Крым, а также других территорий, доступных к использованию цифрового материала, способные влиять на продуктивность виноградных растений (суммы температур выше 10 °С, минимальные температуры воздуха в зимний период и вероятности заморозков, способных повредить урожай);

- привойные и подвойные сорта винограда в сегменте их экологических требований к условиям выращивания;

- технологические особенности эксплуатации виноградных насаждений изучаемых сортов (подвойных и привойных), переведённые в доступную для включения в базу данных цифровую форму.

Предмет исследования. Математически сформулированные индивидуальные и многомерные зависимости продуктивности насаждений винограда и качества производимой продукции от факторов внешней среды.

Задачи исследований:

- определить факторы окружающей среды (почвенные, климатические и агротехнические), оказывающие влияние на продуктивность насаждений винограда;

- для каждого из факторов окружающей среды подобрать критерии цифрового введения параметров в базу данных;

- на основе результатов обследования почв территорий для закладки промышленных насаждений винограда на территории Республики Крым, а также результатов наблюдений за погодой с ближайших к предприятию метеостанций и данных предприятий по продуктивности насаждений винограда составить первичную базу данных для разработки математических моделей;

- на основе обработки результатов созданной базы данных разработать первичные многомерные

регрессионные модели и выявить статистически значимые корреляционные связи факторов окружающей среды и продуктивностью промышленных насаждений винограда;

- разработать индивидуальные (однофакторные) математические модели влияния факторов окружающей среды, имеющих статистическую значимость, на продуктивность насаждений с выявлением значений минимума, оптимума, избыточного и подавляюще избыточного воздействия на растения (с использованием не только собственно полученных данных, но и результатов исследований других исследователей из открытых научных источников);

- разработать многомерные модели прогноза продуктивности сортов, подвойно-привойных комбинаций в зависимости от объективных факторов окружающей среды;

- разработать рекомендации на основе проведённого анализа по корректировке оптимального подбора сортов и подвойно-привойных комбинаций винограда для объективно складывающихся условий в перспективных местах закладки новых насаждений винограда и последующего прогноза их продуктивности.

Результаты и их обсуждение

Исследования в данном направлении проводятся как результат ранее полученных данных при изучении совместимости подвойно-привойных комбинаций винограда. Опыты и наблюдения проводились в период 2018–2021 гг. в Институте «Агротехнологическая академия» (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского». При этом получены результаты, которые показывают возможность создания устойчивых моделей в виноградарстве в разрезе генетических и экологических особенностей растений винограда во взаимодействии с климатическими факторами окружающей среды [20–22].

Используя математический аппарат обработки больших массивов данных как параметрического, так и непараметрического характера установлено, что даже при непараметрическом введении информации на основе Булевой математики возможно создавать модели с высоким уровнем достоверности.

Так, для прогнозирования выхода стандартных привитых черенков после стратификации в зависимости от генотипа подвойно-привойных комбинаций применён подход посортного отображения наличия геноплазмы внутри каждой из изучаемых комбинаций. В итоге разработанная модель показала коэффициент множественной корреляции 0,6969 ($d=r^2=0,4857$) при F – критерии значимости уравнения регрессии $F=6,0210$ (табличное значение $F=2,1270$). Сама модель, в которую было включено пять подвойных и четыре привойных сортов имеет обратную функцию вида:

$$X_{31}=1/(0,0046 + 0,0047 \cdot X_1 + 0,0085 \cdot X_2 + 0,0051 \cdot X_3 + 0,0070 \cdot X_4 - 0,0023 \cdot X_5 - 0,0027 \cdot X_6 + 0,0032 \cdot X_7 - 0,0010 \cdot X_8). \quad (1)$$

В качестве показателей генотипов подвойных и привойных сортов винограда в модель были включены:

X1 – наличие в подвойном сорте геноплазмы *Vitis riparia* (1 – при наличии, или 0 – при отсутствии);

X2 – наличие в подвойном сорте геноплазмы *Vitis rupestris* (1 – при наличии, или 0 – при отсутствии);

X3 – наличие в подвойном сорте геноплазмы *Vitis berlandieri* (1 – при наличии, или 0 – при отсутствии);

X4 – наличие в подвойном сорте геноплазмы *Vitis vinifera var. Chasselas* (1 – при наличии, или 0 – при отсутствии);

X5 – привойный сорт Сира (1 – при наличии, или 0 – при отсутствии);

X6 – привойный сорт Вионье (1 – при наличии, или 0 – при отсутствии);

X7 – привойный сорт Мальбек (1 – при наличии, или 0 – при отсутствии);

X8 – привойный сорт Каберне Совиньон (1 – при наличии, или 0 – при отсутствии);

X31 – выход стандартных привитых черенков после стратификации по ГОСТ 28181-89.

Коэффициент множественной корреляции, равный 0,6969, показывает тесную связь между генотипом и выходом стандартных привитых черенков.

Данная модель показывает принципиальную возможность введения непараметрических данных о генотипе растений и его влиянии на конкретное параметрическое значение, имеющее хозяйственную ценность (в данном случае на выход стандартных привитых стратифицированных черенков). Это открывает перспективы применения такого рода подхода к изучению влияния отдельных сортов с большим их набором для прогноза отдельных результатов не только в опытной работе, но и в производстве для виноградарства. Также, помимо непараметрического отображения геноплазмы в моделях можно провести изучение влияния отдельных групп сортов по их происхождению или наследственных признаков на хозяйственно ценные признаки как в питомниководстве, так и в промышленном производстве виноградовинодельческой продукции.

С другой стороны, возможно создание цифрового двойника каждого конкретного сорта, используя метод регрессионного анализа с введением непараметрического значения отдельного сорта и качественных показателей, имеющих хозяйственную ценность. Нами также в этом направлении была проведена соответствующая работа на примере сорта Каберне Совиньон, введенным непараметрическими значениями «1» и «0», а также погодными факторами условий года и техническими показателями качества лозы. В ниже представленной модели дополнительно включены следующие факторы:

X11 – концентрация углеводов в привойных лозах, %;

X13 – средняя длина лозы привоя, м;

X15 – средняя длина междоузлий привоев, см;

X17 – средний диаметр лоз привоев, мм;

X19 – диаметр сердцевинки привоев, мм;

X23 – площадь поперечного сечения привойной

лозы, мм²;

X25 – площадь поперечного сечения сердцевинки у привойной лозы, мм²;

X27 – площадь поперечного сечения древесины у привойной лозы, мм²;

X29 – коэффициент вызревания (Кв) привойной лозы.

Регрессионная модель подбиралась компьютерной программой расчёта на основе оптимальной достоверности (F критерий). При $F_{\text{факт}}=178,4964$ и табличном значении $F=2,0250$ коэффициент множественной корреляции составил $R=0,9866$, что является очень тесной связью, а регрессионная формула представлена индивидуальной коренной функцией:

$$\begin{aligned} X8 = & -128,17 - 0,15 \cdot \sqrt{(X9)} + 2,13 \cdot \sqrt{(X11)} - \\ & 2,96 \cdot \sqrt{(X13)} - 0,18 \cdot \sqrt{(X15)} + 103,58 \cdot \sqrt{(X17)} + \\ & 50,78 \cdot \sqrt{(X19)} - 6,49 \cdot \sqrt{(X23)} - 26,07 \cdot \sqrt{(X25)} - \\ & 13,80 \cdot \sqrt{(X27)} - 45,07 \cdot \sqrt{(X29)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Полученная формула может считаться эмпирической, однако, основываясь на математических принципах переноса значений, можно создавать интегральную характеристику значений качества лозы в зависимости от выбранных уже известных параметров. К примеру, в данной модели отображена концентрация углеводов (показатель X11) одновременно с другими биометрическими параметрами лозы. Если в ходе изучения параметров лоз по завершении вегетации уже будут известны основные значения, то, переставив в виде функции содержание углеводов, можно спрогнозировать их концентрацию для данного сорта на уровне достоверности 98,66 %.

Подобный подход создания формул, описывающих индивидуальное влияние отдельного сорта, может использоваться практически при прогнозе любых имеющихся в инструментарии значений, которые будут иметь большую точность при увеличении собранных результатов наблюдений как в промышленном виноградарстве, так и на базе опытных участков научно-исследовательских учреждений.

Это открывает широкие возможности в цифровизации прогноза в отрасли виноградарства, что позволит обеспечить его устойчивое развитие в дальнейшем и в большей степени раскроет биологический потенциал культуры с точки зрения продуктивности промышленных насаждений и качества полученной продукции.

Условно факторы, оказывающие влияние на урожайность и качество производимой в виноградарстве продукции, можно разделить на генетические, абиотические, биотические и антропогенные. Все они в той или иной степени изучены достаточно хорошо и продолжают изучаться в зависимости от изменения факторов окружающей среды на местности, появления новых сортов, а также технологических подходов в выращивании и эксплуатации виноградников. Однако их комплексное взаимодействие, выраженное в виде прогнозных моделей, в нашей стране пока что совершенно не развито до уровня переноса их в про-

изводство. Данную работу предстоит проводить, осуществляя поэтапный подход, состоящий из создания полномасштабной базы результатов наблюдений, в которой будут учитываться все основные результаты, в которые должны включаться почвенные, климатические, а также технологические особенности.

Подобную работу по сбору и систематизации данных можно осуществлять на базе материалов, полученных с существующих промышленных виноградников, по которым первоначально имеются проекты на закладку насаждений, с которыми поддерживается информационный контакт. Такую работу выполняет в Крыму ФГБУ «Центр агрохимической службы «Крымский», в котором собираются и систематизируются данные по результатам почвенного анализа, подвойно-привойным комбинациям и продуктивности насаждений. Включив в качестве дополнительного комплекса параметров для моделирования погодные факторы, становится возможным разработать принципиально новые модели прогнозирования продуктивности виноградных насаждений в зависимости от почвенных, климатических и технологических особенностей выращивания.

При этом результаты почвенного анализа в самих проектах на закладку многолетних насаждений уже представлены в виде, используемом в производстве и агрохимических исследований (N, P₂O₅, K₂O, Ca²⁺, Cl, Na, активная известь, активные карбонаты, гумус (или органическое вещество, для технического винограда, содержание тяжелых металлов и токсичных веществ и др.)) по слоям и/или в среднем.

Результаты погодных наблюдений могут учитывать весь жизненный цикл виноградных насаждений за каждый год и в зависимости от района размещения насаждений. Уже разработанная база данных, взятых из открытых источников включает в себя результаты наблюдений в период с 2005 г. по 21 метеостанциям только на территории Крыма по следующим значениям: сумма температур выше 0, 5, 10, 15 °С, продолжительность соответствующего периода накопления температур (в сутках), минимальные температуры воздуха в зимний период, продолжительность холодного периода (с температурами ниже 0 °С), интенсивность холодного периода (по накоплению температур ниже 0 °С), а также ГТК (по Селянинову). В случае применения на виноградниках орошения, можно учитывать объективный показатель ГТК для насаждений с учётом дополнительного баланса воды.

Отдельно следует рассмотреть влияние биотических факторов на виноградное растение в виде математического прогнозирования и ответа на них растений. Уже сегодня разработаны модели, прогнозирующие развитие отдельных болезней и вредителей в зависимости от погодных условий года (Модель Кобишвили для развития грибов оидиума, Модель Мюллера для грибной инфекции милдью и т.д.), однако, часть сортов в ходе селекции, получили полевою или генетическую устойчивость к инфекции или отдельным вредителям (филлоксера), которые на сегодня не учитываются в моделях. Для перспективных исследо-

ваний следует учитывать и подобное влияние, в котором необходимо учитывать возможность преодоления грибной инфекции в отдельные, благоприятные для развития инфекции, годы частично преодолевать подобную устойчивость, что может требовать применения защитных мероприятий в насаждениях. Также, до сих пор не разработан комплекс математических алгоритмов прогноза развития комплекса болезней и вредителей, влияющих на рост и развитие виноградных растений, позволяющих научно-обосновано подходить к выбору системы защиты растений.

Технологические особенности выращивания насаждений как комплекс антропогенного воздействия могут быть оцифрованы параметрическими значениями и включать в себя: плотность посадки в расчёте на 1 га, высоту штамба, количество плодовых звеньев на кусте, длину лоз плодоношения в глазках и см, среднюю нагрузку глазков винограда в расчёте на 1 га. В процессе жизненного цикла насаждений технологические особенности могут выступать и как элементы взаимодействия с абиотическими факторами окружающей среды в виде наблюдений за приростом лозы, её качеством, степенью вызревания и формирования плодоносных глазков, что непосредственно влияет на продуктивность насаждений в последующем. Кроме этого, формирующаяся в течении года вегетации лоза как комплекс органических соединений, на который затрачивается энергия растения, оказывает влияние и на объём и качество урожая виноградников, поэтому должен учитываться в моделях как фактор взаимодействия с продуктивностью растений.

Продуктивность насаждений и технологическое качество товарной продукции в моделях должны являться финальными показателями интегральной оценки. При этом в балансе с затратами энергии растения на формирования древесины, под воздействием внешних абиотических и биотических факторов окружающей среды в перспективе возможна разработка математических моделей, прогнозирующих эффективность производства товарной продукции, отвечающих заданным производителем качествам при объективных почвенно-климатических условиях и выбранной технологии выращивания.

Выводы

Установлено, что для внедрения цифровизации в отрасль виноградарства необходимо применять методы математического моделирования с использованием множественного регрессионного анализа на основе создания баз данных, полученных как на опытных участках, так и из результатов наблюдений за продуктивностью промышленных насаждений.

Определены направления и методологические подходы комплексного изучения влияния почвенных, климатических, биотических и технологических особенностей производства виноградовинодельческой продукции на урожайность насаждений и товарные качества.

Установлена принципиальная возможность использования непараметрических данных, как элементов сортовой принадлежности подвойно-привойных

комбинаций в многофакторной регрессионной модели для характеристики выхода стандартных привитых черенков с тесной связью множественной корреляции ($r=0,6969$).

На основе регрессионной модели показан методологический подход разработки цифрового двойника отдельного сорта винограда (Каберне Совиньон) при изучении технологических качеств лозы. Подобная методология может применяться как для решения научных вопросов, так и в виде интегральной характеристики, применяться для текущего прогноза качественных характеристик (с достоверностью $r=0,9866$).

Показаны перспективные направления для дальнейших исследований в сфере цифровизации отрасли виноградарства с учётом последующего внедрения результатов исследований, как комплексных прогнозных моделей, в производство.

Источник финансирования

Не указан.

Financing source

Not specified.

Конфликт интересов

Не заявлен.

Conflict of interests

Not declared.

Список литературы/References

1. Laurent C., Baptiste O., Taylor J.A., Scholasch T., Metay A., Tisseyre B. A review of the issues, methods and perspectives for yield estimation, prediction and forecasting in viticulture. *European Journal of Agronomy*. 2021;130(4):126339. DOI 10.1016/J.EJA.2021.126339.
2. Beauchet S., Cariou V., Renaud-Gentie C., Meunier M., Siret R., Thiollet-Scholtus M., Jourjon F. Modeling grape quality by multivariate analysis of viticulture practices, soil and climate. *OENO One*. 2020;54(3):601-622. DOI 10.20870/oeno-one....1067.
3. Junqi Z., Parker A., Gou F., Agnew R. H., Yang L., Greven M., Raw V., Neal S.M., Martin D., Trought M.C.T., Huth N., Brown H.E. Developing perennial fruit crop models in APSIM Next Generation using grapevine as an example. *In Silico Plants*. 2021;3(2):1-23. DOI 10.1093/insilicoplants/diab021.
4. Laurent C., Le Moguédec G., Taylor J.A., Scholasch T., Tisseyre B., Metay A. Local influence of climate on grapevine: an analytical process involving a functional and Bayesian exploration of farm data time series synchronized with an eGDD thermal index. *OENO One*. 2022;56(2):301-317. DOI 10.20870/oeno-one.2022.56.2.5443.
5. Sanjay S.M., Mendes-Moreira J., Ferreira C.A., Cunha M. Machine learning predictive model of grapevine yield based on agroclimatic patterns. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2019;12(4):443-450. DOI 10.1016/J.EAEF.2019.07.003.
6. Bulling M.R., Meirelles Alves S.A., Gebler L. Computational models in precision fruit growing: Reviewing the impact of temporal variability on perennial crop yield assessment. *SN Computer Science*. 2023;4(5):1-13. DOI 10.1007/s42979-023-02103-6.
7. Baptiste O., Zhang Y., Gras J.-P., Valloo Y., Faure P., Brunel G., Tisseyre B. High spatial resolution dataset of grapevine yield components at the within-field level. *Data in Brief*. 2023;50(3):109580. DOI 10.1016/j.dib.2023.109580.
8. Laurent C., Baragatti M.C., Taylor J.A., Scholasch T., Metay A., Tisseyre B. Evaluation of a functional Bayesian method to analyze time series data in precision viticulture. *Precision Agriculture* '19. 2019:67-73. DOI 10.3920/978-90-8686-888-9_7.
9. Hugo F.-M., Guilpart N., Lagacherie P., Le Roux R., Plaige M., Dumont M., Gautier M., Graveline N., Touzard J.-M., Hannin H., Gary C. Grapevine yield gap: identification of environmental limitations by soil and climate zoning in the region of Languedoc-Roussillon (South of France). *OENO One*. 2023;57(2):360-378. DOI 10.20870/oeno-one.2023.57.2.7246.
10. Kadhane S.J., Manekar V.L. Development of agro-climatic grape yield model with future prospective. *Italian Journal of Agrometeorology*. 2021;1:89-103. DOI 10.36253/ijam-406.
11. Слинко О.В., Кондратьева О.В. Цифровые технологии в садоводстве // Инновационные технологии в АПК: теория и практика: сборник статей. 2021;200-203. Slinko O.V., Kondrateva O.V. Digital technologies in horticulture. *Innovative technologies in agriculture: theory and practice: a collection of articles*. 2021;200-203 (in Russian).
12. Conrard T. Choosing multiple linear regressions for weather-based crop yield prediction with ABSOLUT v1.2 applied to the districts of Germany. *International Journal of Biometeorology*. 2022;66(3):2287-2300. DOI 10.1007/s00484-022-02356-5.
13. Beauchet S., Cariou V., Renaud-Gentie C., Meunier M., Siret R., Thiollet-Scholtus M., Jourjon F. Modeling grape quality by multivariate analysis of viticulture practices, soil and climate. *OENO One*. 2020;54(3):601-622. DOI 10.20870/oeno-one.1067.
14. Bustani A.C., Moura-Bueno J.M., Comin J.J., Brunetto G. Grape yield prediction models: Approaching different machine learning algorithms. *Horticulturae*. 2023;9(12):1294. DOI 10.3390/horticulturae9121294.
15. Fotoula D.E., Charalampopoulos I. Future climate change impacts on European viticulture: A review on recent scientific advances. *Atmosphere*. 2021;12(4):495. DOI 10.3390/ATMOS12040495.
16. Vjekoslav T., Gligorević K., Mileusnic Z., Miodragović R.M., Hajmiler M., Radočaj D. Agricultural engineering technologies in the control of frost damage in permanent plantations. *AgriEngineering*. 2023;5(4):2079-2111. DOI 10.3390/agriengineering5040128.
17. Merot A., Metay A., Smits N.G.E., Thiollet-Scholtus M. Adaptation of the regional agronomic diagnosis for grapevine yield analysis. *OENO One*. 2022;56(1):87-99. DOI 10.20870/oeno-one.2022.56.1.4568.
18. Марморштейн А.А., Петров В.С. Прогностическая модель минимальной урожайности ранних столовых сортов винограда межвидового происхождения для Краснодарского края // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2023;79(1):1-11. DOI 10.30679/2219-5335-2023-1-79-1-11. Marmorshtein A.A., Petrov V.S. A prognostic model of the minimum yield capacity of interspecific early table grape varieties of the Krasnodar region. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2023;79(1):1-11. DOI 10.30679/2219-5335-2023-1-79-1-11 (in Russian).
19. Jakup F., Hamiti M., Krrabaj S., Selimi B., Idrizi E. Proposal of prediction model for smart agriculture based on IoT sensor data. 46th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO). 2023;120-125. DOI 10.23919/MIPRO57284.2023.10159955.
20. Иванова М.И., Иванченко В.И., Потанин Д.В. Перспективы разработки цифровых моделей сортов винограда для прогнозирования результативности технологических процессов // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2024;85(1):157-173. DOI 10.30679/2219-5335-2024-1-85-157-173. Ivanova M.I., Ivanchenko V.I., Potanin D.V. Prospects for the

- development of digital models of grape varieties for predicting the effectiveness of technological processes. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2024;85(1):157-173. DOI 10.30679/2219-5335-2024-1-85-157-173 (*in Russian*).
21. Потанин Д.В., Иванова М.И., Иванченко В.И., Замета О.Г. Применение регрессионного анализа для изучения влияния происхождения подвоев на совместимость сорто-подвойных комбинаций винограда // «Магарач». Виноградарство и виноделие. 2022;24(3):219-226. DOI 10.35547/IM.2022.87.84.004.
Potanin D.V., Ivanova M.I., Ivanchenko V.I., Zameta O.G. The use of regression analysis to study the effect of the origin of rootstocks on compatibility of variety-rootstock combinations of grapes. *Magarach. Viticulture and Winemaking*. 2022;24(3):219-226. DOI 10.35547/IM.2022.87.84.004 (*in Russian*).
22. Потанин Д.В., Иванова М.И., Иванченко В.И., Иванченко К.В. Адаптивный метод подбора сортов плодовых культур и винограда по морозостойкости для обеспечения стабильного плодоношения многолетних насаждений // Известия Дагестанского ГАУ. 2022;4(16):102-110. DOI 10.52671/26867591_2022_4_102.
Potanin D.V., Ivanova M.I., Ivanchenko V.I., Ivanchenko K.V. Adaptive method of selection of varieties of fruit crops and grapes for frost resistance to ensure stable fruiting of perennial plantings. *Dagestan SAU Proceedings*. 2022;4(16):102-110. DOI 10.52671/26867591_2022_4_102 (*in Russian*).

Информация об авторах

Маргарита Игоревна Иванова, канд. с.-х. наук, нач. отдела организации учета применения средств химизации и разработки проектно-сметной документации; e-мэйл: imi_2712@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3749-9525>;

Вячеслав Иосифович Иванченко, д-р с.-х. наук, проф. кафедры плодовоощеводства и виноградарства; e-мэйл: magarach.iv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8545-4233>;

Дмитрий Валериевич Потанин, д-р с.-х. наук, доц. кафедры плодовоощеводства и виноградарства; e-мэйл: potanin.07@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3724-8758>.

Information about authors

Margarita I. Ivanova, Cand. Agric. Sci., Head of the Department for Organization of Accounting for the Use of Chemicals and Development of Design and Estimate Documentation; e-mail: imi_2712@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3749-9525>;

Vyacheslav I. Ivanchenko, Dr. Agric. Sci., Professor, Department of Fruit and Vegetable Growing and Viticulture; e-mail: magarach.iv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8545-4233>;

Dmitry V. Potanin, Dr. Agric. Sci., Associate Professor, Department of Fruit and Vegetable Growing and Viticulture; e-mail: potanin.07@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3724-8758>.

Статья поступила в редакцию 30.06.2024, одобрена после рецензии 10.07.2024, принята к публикации 27.08.2024.