

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.154>

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОТЕРИ ВЛАГИ КУЛЬТУРОЙ И ПОЧВОЙ В ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКАХ (ЦД) АГРОПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Обзор

Сафонова Т.В.¹, Колбина О.Н.², Яготинцева Н.В.³, Мокряк А.В.^{4*}, Истомин Е.П.⁵

¹ORCID : 0000-0003-0969-3387;

⁴ORCID : 0000-0002-6630-4045;

⁵ORCID : 0000-0002-2203-4063;

^{1, 2, 3, 5} Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mokryakanna[at]mail.ru)

Аннотация

Успехи по увеличению эффективности показателей сельскохозяйственной отрасли дают возможность преодолеть глобальные проблемы голода и бедности населения. За счет активного использования современных цифровых сельскохозяйственных технологий происходит глобальная автоматизация производственного процесса.

Значительной проблемой может стать ситуация с засухой или повышенной влажностью, которая ведет к неустойчивости валового сбора зерна. В статье проведен анализ процесса цифровизации сельского хозяйства, создана модель эвапотранспирации применимая при создании цифровых двойников агропромышленных комплексов.

Цифровые двойники – это следующий этап усовершенствования работы в аграрном секторе экономики посредством современных технологий, который позволит моделировать результаты применяемых решений.

Ключевые слова: цифровой двойник, эвапотранспирация, аграрная промышленность, геоинформационная модель.

APPLICATION OF A MATHEMATICAL MODEL OF CROP AND SOIL MOISTURE LOSS IN DIGITAL DOUBLES (DDS) OF AGRO-INDUSTRIAL ENTITIES

Review article

Safonova T.V.¹, Kolbina O.N.², Yagotintseva N.V.³, Mokryak A.V.^{4*}, Istomin Y.P.⁵

¹ORCID : 0000-0003-0969-3387;

⁴ORCID : 0000-0002-6630-4045;

⁵ORCID : 0000-0002-2203-4063;

^{1, 2, 3, 5} Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russian Federation

⁴ Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (mokryakanna[at]mail.ru)

Abstract

Advances in improving the performance of the agricultural industry are making it possible to overcome the global problems of hunger and poverty. Global automation of the production process is happening through the active use of modern digital agricultural technologies.

A significant problem can be the situation with drought or high humidity, which leads to the volatility of the gross grain harvest. The article analyses the process of digitalization of agriculture and creates an evapotranspiration model applicable to the creation of digital doubles of agro-industrial complexes.

Digital doubles are the next stage of improving work in the agricultural sector of the economy through modern technology, which will allow to model the results of the applied solutions.

Keywords: digital double, evapotranspiration, agricultural industry, geoinformation model.

Введение

Аграрная промышленность на общемировом уровне составляет в среднем 10% мирового ВВП, что бесспорно указывает на общепризнанный успех огромного количества стран, которые обладают благоприятными климатическими показателями, включая наличие сопутствующих факторов для развития отрасли. Успехи по увеличению эффективности показателей сельскохозяйственной отрасли дают возможность преодолеть глобальные проблемы голода и бедности населения [1]. За счет активного использования современных цифровых сельскохозяйственных технологий, уровень которых в России возрастает до уровня развитых стран, происходит глобальная автоматизация производственного процесса, который напрямую способствует росту доходности в целом.

В течение последних десяти лет проводился масштабный анализ развития, внедрения и последующей эксплуатации цифровых технологий агропромышленного производства, которые продемонстрировали существенный рост производительности, благодаря разумному применению земных и водных ресурсов. Значительная эффективность в процессе реализации задач по увеличению уровня производительности может быть достигнута за счет формирования геоинформационной модели динамического объекта (где объектом является территория агропромышленного комплекса с изменяемыми пространственными и пространственно-временными данными), которая будет воплощена в цифровых двойниках (ЦД) сельскохозяйственных объектов. Подобный ЦД сможет помочь

в осуществлении многих научных исследований и разработок, что действительно подтверждается апробацией аналогичных проектов в других отраслях [1], [2].

Современное состояние и тенденции развития зернового комплекса Российской Федерации

Влияние погодных условий существенно меняет организацию посевных территорий, т. е. производства сельскохозяйственных культур в целом. Глобальной проблемой может стать такая ситуация как засушливый или влажный периоды, что ведет к неустойчивости валового сбора зерна.

Центральным звеном агропромышленного комплекса Российской Федерации является производство зерновых культур, которое стало самой масштабной подотраслью сельскохозяйственного сектора [2]. Развитие производства зерновых культур существенным образом влияет на обеспечение продовольственной безопасности страны, благополучие народа, доступность продуктов питания, повышение уровня жизни, финансового положения сельскохозяйственных производителей. Ориентируясь на положение Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации, предельная величина удельного веса зерна отечественного производства в общем объеме ресурсов зерна внутреннего рынка должно быть не менее 95%. Стоит отметить, что в последние годы предельная величина удельного веса зерна не падала ниже указанного уровня. Во исполнение перечня поручений Президента Российской Федерации от 12 июня 2017 г. № Пр-1127 (подпункт «а» пункта 1 раздела I) в рамках изменений, вносимых в положения Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации, для оценки продовольственной независимости формируются показатели уровня самообеспечения в виде процентного отношения объема отечественного производства сельскохозяйственных товаров к объему внутреннего потребления, опирающиеся на пороговые значения, которые составляют в отношении зерна 95%. Однако на протяжении последних лет этот показатель находится на уровне 140–150%, что говорит о том, что население Российской Федерации полностью обеспечено зерном, а также происходит формирование отрасли животноводства и наращивание экспортного потенциала. Основная роль зерновых культур в обеспечении продовольственной безопасности также строится на основе технологических возможностей создания резервов и запасов зерна, которые рассчитаны для гарантированного снабжения населения, при этом ориентируясь на агроклиматические и географические особенности страны [3].

Риски, влияющие на развитие зернового комплекса:

- агроэкологические риски, которые напрямую связаны с климатическими изменениями, включая всевозможные последствия чрезвычайных природных и техногенных обстоятельств;
- технологические риски, связанные с последствиями неполноценного развития отечественной техники в отличие от уровня развитых стран в отношении технологического процветания;
- макроэкономические риски, которые возникают вследствие спада инвестиционной привлекательности и конкурентоспособности отечественной сельхозпродукции;
- внешнеторговые риски, вызванные усилением потребностей к показателям зерновых культур, включая регулярные переработки политических и товарных условий в других странах;
- социальные риски, вызванные всевозможными изменениями характеристиками здоровья населения, а также социально-экономическими условиями в стране, которые напрямую влияют на уровень потребления товаров сельскохозяйственной отрасли [4].

Агроэкологические риски

Воздействие природных и климатических факторов на состояние производства в агропромышленном комплексе, включая условия природного и техногенного характера приводит к возникновению агроэкологических рисков. Самым глобальным агроэкологическим риском для сельскохозяйственной отрасли является ухудшение климатических показателей.

Следует отметить такие негативные показатели агроэкологических рисков как рост среднегодовых температур на преобладающих территориях главных зернопроизводящих регионах страны в ранние сроки вегетации, что способствует распространению определенных вредителей злаковых культур.

Однако нашествие вредителей – не единственная проблема, которая может возникнуть из-за увеличения среднегодовых температур [5]. Длительные осадки в более поздние сроки вегетации, которые преобладают на протяжении последних лет в некоторых регионах страны, негативно сказываются на состоянии зерновых культур, приводя к различным заболеваниям, снижению качества зерна, а в период их уборки приводят к негативным условиям для полевых работ и его хранения.

Острая необходимость водных ресурсов, связанная с регулярным орошением сельских угодий, стала основной проблемой агропромышленного комплекса. Еще одним фактором с негативным влиянием является дефицит ресурсов для финансирования капитальных инвестиций на подготовку систем с целью снабжения сельскохозяйственных земель водными ресурсами.

Преобладание негативных изменений природно-климатических факторов способствует увеличению себестоимости зерна, а также уменьшению его объемов.

Стоит отметить, что риск возникновения ситуации, в которой может возникнуть резкий спад урожайности сельскохозяйственных культур, напрямую влияет на логистику и обеспечивающие механизмы страны, перерабатывающую промышленность, область сбыта зерновых и продуктов ее переработки за счет отрицательного воздействия на условия функционирования продовольственной безопасности [6], [7].

Следует обратить внимание на косвенные признаки, подтверждающие возникновение агроэкологических рисков, к примеру: увеличение внешнеторгового обеспечения сельскохозяйственного сырья и продовольствия, снижение загрузки производственных мощностей на сельскохозяйственных предприятиях, спад или отмена экспорта продукции.

Для формирования безопасного функционирования, а также с целью возмещения отрицательного воздействия природно-климатических факторов предполагается рост территории, на которых будут применяться

высокопродуктивные засухоустойчивые семена, глобальное увеличение области применения водосберегающего орошения и ресурсосберегающих технологий, включая рост площади озимых сельскохозяйственных культур.

Расположение и организация сельскохозяйственных территорий по областям будет формироваться исходя из режима увлажнения, в том числе на основе показателей увлажнения. Требуется обязательное планирование роста объемов применения всевозможных удобрений и средств защиты зерновых.

Показания гидротермического коэффициента в ближайшие 10 лет поменяются по регионам страны в пределе от +0,06 (Южный и Северо-Кавказский федеральные округа) до -0,15 (Уральский федеральный округ).

Необходимо подчеркнуть, что значение гидротермического коэффициента, составляющая 0,6 и менее, является одним из критериев причисления региона субъекта Российской Федерации к нежелательной для сельскохозяйственного производства товаров.

Уменьшение содержания влаги в почвенных покровах на начало вегетации и на середину июня и июля фактически по всей площади страны (помимо некоторых областей Сибирского федерального округа) подтверждает негативное снижение состояния влагообеспеченности посевов зерновых. Стоит добавить, что количество дней вегетационного периода, в условиях того, что влажность пахотного слоя грунта падает к показателю 10 мм, в ближайшее десятилетие будет расти.

В связи с этим стоит обратить внимание на информационные способы поддержания высокой производительности сельскохозяйственной деятельности, в том числе с использованием сквозных технологий.

Информационное и материально-техническое обеспечение производства зерна

В процессе производства зерновых культур немаловажное значение имеют материально-технические ресурсы.

Начиная с 2017 г. Правительство Российской Федерации стало отдавать предпочтение цифровым технологиям в сельскохозяйственном секторе.

Опираясь на опыт последних десяти лет, стоит отметить рост по уровню внедрения интернет-технологий, использования спутниковой связи, геопозиционирования, применения робототехники, сельскохозяйственных цифровых датчиков, а также систем автоматизации. В настоящее время активно используются в области земледелия системы ГЛОНАСС и GPS, которые способствуют росту показателей точности в реализации двигательных функций техники по территории поля, на базе которых стала формироваться технология контролируемого проезда по полю (СТФ), что в перспективе обеспечивает полноценную замену на роботизированный транспорт и полную автоматизацию в агропромышленном комплексе. Посредством применения чувствительных датчиков, которые нацелены на мониторинг за показателями почвы, удастся качественно и эффективно учитывать ее состав на определенных участках и рационально вносить удобрения там, где это действительно необходимо.

Применение цифровых датчиков и сенсоров в области земледелия является прорывным решением на пути к реализации интеллектуального сельскохозяйственного производства.

При размещении датчиков даже на десятках квадратных километров можно непрерывно передавать по радиоканалам данные о показателях почвы и культур на контролируемых объектах, включающих показатели влажности, температуры воздуха и почвы, состоянии здоровья растений и пр.

К примеру, основным компонентом системы выявления показателей состояния почвы являются сенсоры, установленные в контрольных точках. Такие датчики рассчитаны на выявление таких характеристик как: неоднородность рельефа, тип почвы, освещенности территории и т. д. Измеряемые параметры пересылаются на сервер, а далее – на устройства пользователей. Имея все необходимые данные, агрономы принимают решения о том, какие сельскохозяйственные культуры можно качественнее и эффективнее выращивать на конкретном участке поля, так как на одном участке поля может произрастать не одна культура, а несколько. Имея все необходимые данные можно формировать грамотные рекомендации по уходу за культурами [5].

Наиболее применяемые датчики в земледелии – это сенсоры по контролю влажности почвы, активно используемые сельскохозяйственными производителями, которые выращивают культуры на орошении.

Зачастую подобные сенсоры подключаются к облачным сервисам, которые позволяют мгновенно передавать информацию. Если ориентироваться на ручной полив, то норма расхода воды рассчитывается заранее и не включает многих факторов, результатом чего становится избыточная циркуляция воды, сопровождаемая последующей эрозией почвы. Датчики же напротив могут определить, учитывая тип агрокультуры, фазу роста и пр., когда почва достаточно увлажнена, чтобы избежать последующего переувлажнения. Такой подход позволит существенно сократить расход воды.

Датчики дают возможность не только грамотно выращивать агрокультуры, но и качественно хранить урожай. Регулярные измерения влажности и температуры на территории складских помещений осуществляются в соответствии с графиком, либо в режиме реального времени, а также включает настройку сенсоров под индивидуальные характеристики культур, что позволяет как можно дольше хранить урожай. Современные сельскохозяйственные цифровые технологии позволяют выявлять загнивание, даже если фрукты или овощи хранятся в больших навалах.

В отдельных случаях такие сенсоры ставят наравне с базовыми средствами производства, так как они работают совместно. Опыт зарубежных коллег демонстрирует нам, что даже малые фермы, размером в несколько десятков гектар получают существенный экономический эффект от использования датчиков, так как они позволяют принять грамотное решение по выращиванию культуры своевременно. Собственник фермы неминуемо придет к решению по автоматизации производственного процесса вне зависимости от размера своего сельскохозяйственного угодья, если он нацелен на развитие бизнеса и обдумывает все варианты оптимизации затрат.

В настоящее время на территории Российской Федерации лишь 10% пашни обрабатывается посредством цифровых систем, а точнее с использованием технологий точного земледелия, которые аккумулируют в себе следующие технологии цифровой трансформации: определение границ поля с использованием спутниковых систем

навигации; дифференцированное внесение удобрений; составление цифровых карт; планирование урожайности; дифференцированное опрыскивание; мониторинг состояния посевов с использованием дистанционного зондирования; локальный отбор проб почвы в системе координат; дистанционное зондирование (аэро- или спутниковая фотосъемка); системы параллельного вождения; мониторинг качества урожая; дифференцированное внесение регуляторов роста; дифференцированный по площади посев; дифференцированная обработка почвы; составление карт электропроводности почв; беспилотная сельскохозяйственная техника; интернет вещей (Internet of Things – IoT), анализ «больших данных» (Big Data), искусственный интеллект.

Из опыта отечественных агрохозяйств наиболее удачное решение эксплуатации информационных технологий в сельском хозяйстве заключается в применении геоинформационных систем, которые используют интернет вещей (IoT), анализ Big Data, искусственный интеллект и позволяют управлять производством в единой системе.

Цифровые двойники – это следующий этап усовершенствования работы в агропромышленном секторе экономики посредством современных технологий, который позволит моделировать результаты применяемых решений, основываясь на всем спектре собранных данных, что в конечном результате приведет к экономии времени и средств, а также поможет избежать вреда для людей и окружающей среды.

Для создания цифровых моделей любых объектов, систем и процессов, необходимо описать алгоритмы работы и построить множества математических моделей поведения, зависящих от заданных условий, что передвигает реализацию данной идеи во времени.

Модель расчета эвапотранспирации

Одним из незаменимых показателей в сельскохозяйственной отрасли является уровень влагообеспеченности выращиваемых культур.

Для осуществления расчета параметров влагообеспеченности необходимо принимать во внимание процесс эвапотранспирации, сочетающий в себе показатели испарения влаги из почвы, а также испарение влаги растениями – ET (транспирация).

Чтобы реализовать переход состояния молекулы воды в состояние пара требуется энергия, которая формируется посредством оказания влияния прямой солнечной радиации, а также температуры воздуха. Необходимо отметить, что в результате тщательного анализа процесса испарения были отмечены климатические параметры, оказывающие существенное влияние на данный процесс (рис.1).



Рисунок 1 - Природные факторы влияющие на процесс испарения влаги
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.154.1>

Испарение и транспирация в основном происходят одновременно и их достаточно трудно определить по отдельности. Кроме наличия влаги в почве, для почвы, покрытой растительностью, требуется часть солнечной радиации, которая попадает на поверхность. Стоит учитывать, что эта часть уменьшается в вегетационный период, потому что кроны растений затеняют основную территорию сельскохозяйственных угодий. Когда растения еще не

достигли пика в росте, вода в основном используется на испарение с почвы, потом в процессе развития и роста культура покрывает основную площадь полей и транспирация начинает доминировать [9].

В области расчетных методов эвапотранспирации популярен метод Пенмана-Монтейта, который утвержден как стандарт оценки эвапотранспирации по климатическим данным. Эталонная эвапотранспирация по модели Пенмана-Монтейта представлена следующим уравнением, которое было выведено из уравнений аэродинамики и сопротивления растительности

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_8 - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34)u_2} \quad (1)$$

где ET_0 – эталонная эвапотранспирация [мм сут^{-1}];
 R_n – чистая радиация на культуре [$\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$];
 G – плотность теплового потока почвы [$\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$];
 T – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м [$^{\circ}\text{C}$];
 u_2 – скорость ветра на высоте 2 м [м с^{-1}];
 e_8 – давление насыщенного пара [кПа];
 e_a – фактическое давление пара [кПа];
 $(e_8 - e_a)$ – дефицит давления насыщенного пара [кПа];
 Δ – наклон кривой давления пара [$\text{кПа } ^{\circ}\text{C}^{-1}$];
 γ – психометрическая постоянная [$\text{кПа } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Показатель эвапотранспирации во время жаркой и сухой погоды возрастает посредством сухости воздуха и энергии от прямой солнечной радиации, а также скрытого тепла. При подобных климатических показателях в воздухе образуется много водяных паров, до момента пока ветер позволит удалиться с поверхности. Однако в условиях влажной погоды значительная влажность воздуха при облачной погоде уменьшает показатель эвапотранспирации. Поэтому чем суше воздух, тем значительнее воздействие на ET и тем сильнее градиент кривой. При высоких показателях влажности ветер может заместить насыщенный парами воздух менее насыщенным и снять тепловую энергию. Поэтому скорость ветра воздействует на эвапотранспирацию в меньшей степени, чем в аридных условиях, где незначительные изменения скорости ветра могут выразиться в значительных изменениях скорости эвапотранспирации.

В ходе научных изысканий была построена модель, рассчитывающая показатель эвапотранспирации на основе данных, которые характеризуют состояние окружающей среды и могут учитываться при эксплуатации цифрового двойника агропромышленного комплекса [10], [11], [12] (рис. 2, 3).

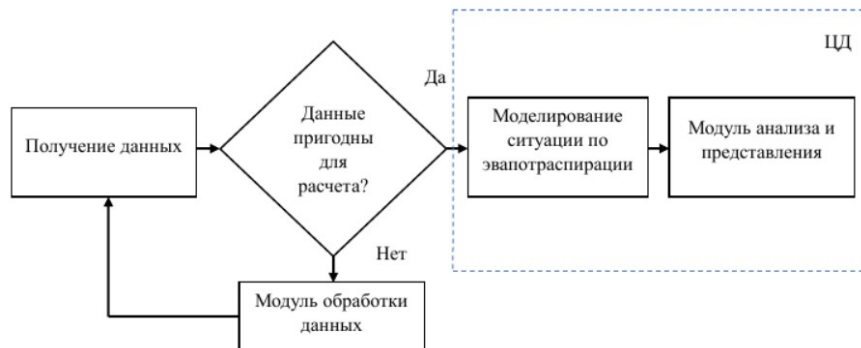


Рисунок 2 - Концептуальная модель цифрового двойника при вычислении эвапотранспирации

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.154.2>

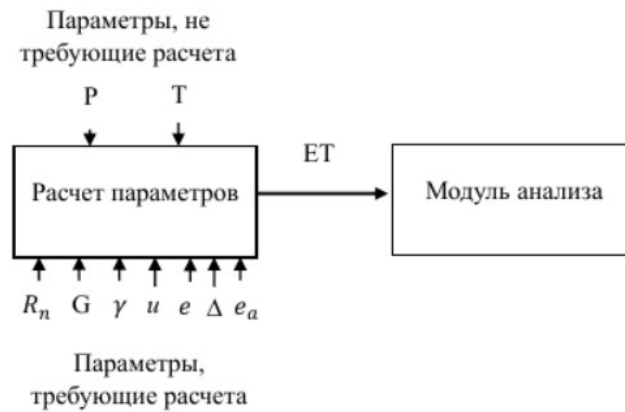


Рисунок 3 - Модель оценки состояния показателя эвапотранспирации
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.154.3>

Апробация модели была произведена из расчета данных в различных районах Ростовской области (рис.4). Результат исследования дает возможность выявить зависимости, которые отображают показатель эвапотранспирации на культуре, основываясь на погодных условиях.

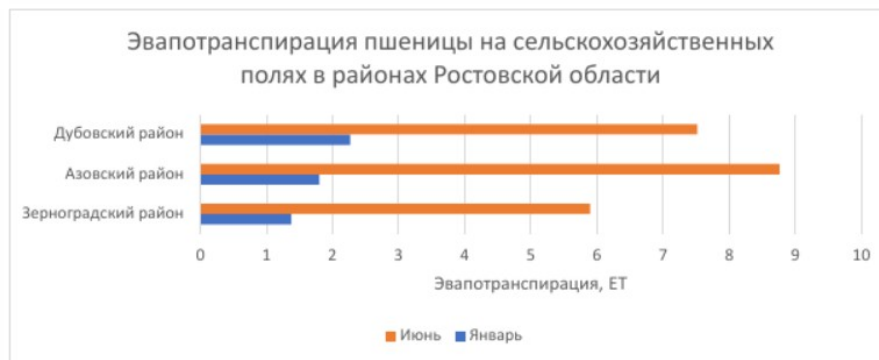


Рисунок 4 - Динамика показателя эвапотранспирации в соответствии с погодными условиями
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.154.4>

На рисунках 5–7 представлены графики среднемесячной температуры, влажности воздуха и среднесуточное количество солнечных часов по районам Ростовской области, что демонстрирует удачное воплощение в жизнь предложенной модели расчета эвапотранспирации и её прогнозирования.

Результаты, полученные для районов Ростовской области с использованием созданной модели (рис. 5), демонстрируют рост коэффициента с ростом температуры, понижением влажности и ростом солнечной активности.

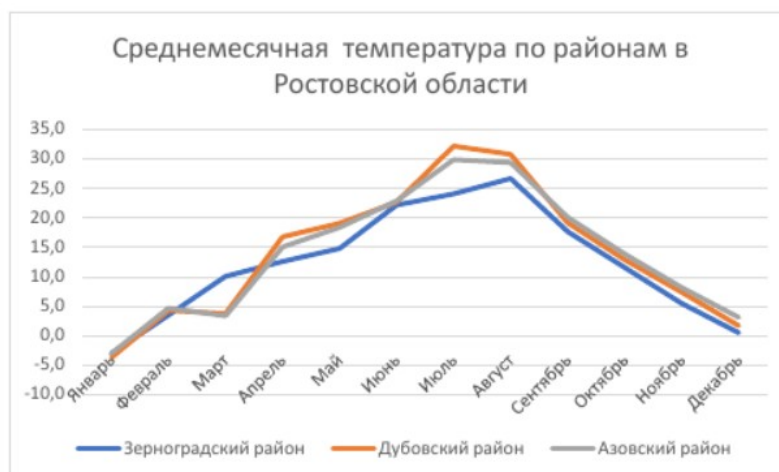


Рисунок 5 - Среднемесячная температура по районам в Ростовской области за календарный год
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.154.5>

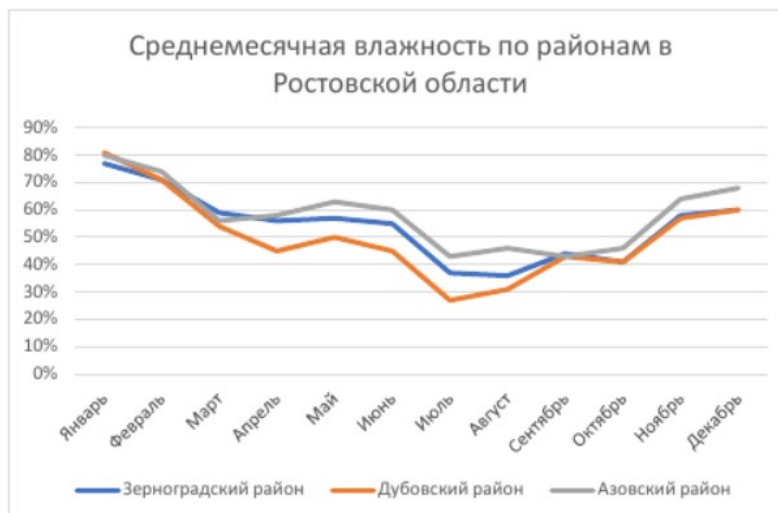


Рисунок 6 - Среднемесячная влажность воздуха по районам в Ростовской области за календарный год
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.154.6>

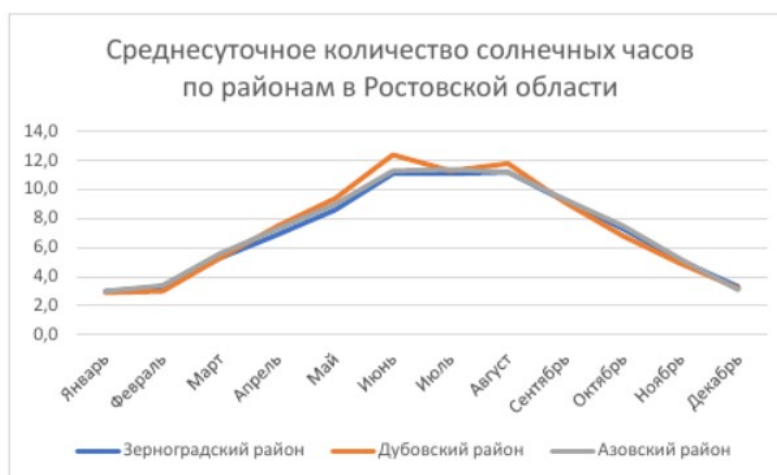


Рисунок 7 - Среднесуточное количество солнечных часов по районам в Ростовской области за календарный год
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.154.7>

Данная модель может быть использована в геоинформационных цифровых двойниках для прогнозирования при вводе расчетных параметров, либо для отслеживания состояния сельскохозяйственных культур при получении непрерывного потока данных с датчиков и помощи в принятии решения по уходу за растениями. Посредством осуществления регулярного анализа данных, который отображает уровень прироста или снижения эффективности сельскохозяйственных работ, прогнозирования урожайности культур, а также оценки потерь появляется возможность определять оптимальную цену на оборудование и материалы, необходимые для сбора урожая, а также выявлять закупочную стоимость на продукцию агропромышленного сектора.

Заключение

В настоящее время грамотная эксплуатация, сохранение и восстановление орошаемых территорий в урбанизированном мире становится достаточно сложной и не терпящей отлагательства задачей. Проекты и решения по сбережению и адекватному использованию водо-земельных ресурсов и связанному с ними бизнесу очень противоречивы и формируются в обстановке столкновения интересов и с высокой степенью неопределенности. Программное обеспечение в геоинформационных системах (ГИС) с возможностью интеграции технологии ЦД позволяет агрономам с легкостью применять имеющиеся источники табличной и картографической информации для роста качества принимаемых решений.

ГИС помогает реализовать дистанционный мониторинг за ходом работы агропромышленной отрасли, включая управление процессами в реальном времени, что позволяет проводить эффективный анализ на основе полученных

данных. Такой подход дает возможность оперативно контролировать локацию технологического оборудования и управлять работой персонала.

Интегрирование технологии ГИС с современными разработками в области аграрного сектора позволит усовершенствовать процесс мониторинга и управления производством, основываясь на актуально собранных геоданных.

Главным элементом системы по определению показателей состояния территории являются сенсоры, которые размещаются на контрольных точках. Представленные сенсоры ориентированы на выявление таких показателей как: неоднородность рельефа, тип почвы, освещенности территории и т. д. Собранные показатели о состоянии почвы передаются на сервер, а далее – непосредственно на устройства пользователей. На основе полученных данных агрономы принимают решения о том, какие сельскохозяйственные культуры можно качественнее и эффективнее выращивать на конкретном участке поля, ввиду того, что на одной территории может произрастать несколько зерновых культур. На основе имеющихся геоданных формируются корректные рекомендации по уходу за культурами.

Наиболее распространенными сенсорными датчиками в отрасли земледелия являются сенсоры по контролю показателей влажности почвы (включая суммарное испарение влаги из почвы и поверхности растительности), которые масштабно используются производителями агропромышленного комплекса для выращивания культур на орошении.

В результате научных изысканий и опытных экспериментов была создана модель потери влаги культурой и почвой в процессе ее жизнедеятельности при учете внешних измеряемых показателях об окружающей среде, а именно: уровень чистой радиации на поверхности урожая, давление пара насыщения, фактическое давление пара, наклон кривой давления пара и плотности теплового потока почвы, что позволит применять ее для последующего использования в процессе формирования цифрового двойника любого агропромышленного комплекса.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Прохоров А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное / А. Прохоров, М. Лысачев — Москва: М.: ООО «АльянсПринт», 2020. — 401 с.
2. Датчики для “умного растениеводства”. — URL: <https://agriecommission.com/base/datchiki-dlya-umnogo-rastenievodstva> (дата обращения: 10.06.2023)
3. Ничипорович А. А. О путях повышения продуктивности фотосинтеза растений в посевах / А. А. Ничипорович // Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — С. 5–36.
4. Статистическое моделирование и прогнозирование: учеб. пособие / Под ред. А.Г. Гранберга. — М.: Финансы и статистика, 2000. — 383 с
5. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов / А.Н. Полевой. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 320 с.
6. Колбина О.Н. Цифровизация сельскохозяйственной отрасли / О.Н. Колбина, Н.В. Яготинцева, Т.В. Сафонова [и др.] // Научные известия. — 2022. — №29. — С.148-151.
7. Русскин В.Д. Использование цифровых двойников в крупном производстве / В.Д. Русскин, Т.В. Сафонова // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2022. — №3(43). — С.51-57.
8. Булгакова А.В. Применение цифровых двойников в строительной отрасли / А.В. Булгакова, Т.В. Сафонова // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2022. — №3(43). — С.19-23.
9. Allen R.G. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 / R.G. Allen [et al.] // FAO, Rome. — 1998 — Vol. 300, no. 9.
10. Meissner R. Measurement of Dew, Fog, and Rime with a High Precision Gravitation Lysimeter / R. Meissner [et al.] // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. — 2007 — Vol.170, no. 3 — P. 335–344.
11. Ефимов А.Е. Мониторинг эвапотранспирации на сельскохозяйственном поле, определение норм и сроков полива автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом / А.Е. Ефимов, Ю.Р. Ситдикова, А.В. Доброхотов [и др.] // Водные ресурсы. — 2018. — Т.45. — №1. — С.100-105.
12. Доброхотов А.В. Определение пространственного распределения суммарной радиации в зависимости от типов и количества облачности с использованием данных фактора мутности Линке и цифровой модели рельефа / А.В. Доброхотов // Вестник СГУТиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). — 2018. — Т.23. — №4. — С. 33-45.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Prohorov A. Tsifrovoy dvojniki. Analiz, trendy, mirovoj opyt. Izdanie pervoe, ispravlennoe i dopolnennoe [Digital Twin. Analysis, Trends, World Experience. First edition, revised and enlarged] / A. Prohorov, M. Lysachev — Moskva: М.: ООО «Al'jansPrint», 2020. — 401 p. [in Russian]

2. Datchiki dlya “umnogo rastenievodstva” [Sensors for “smart crop production”]. — URL: <https://agriecommission.com/base/datchiki-dlya-umnogo-rastenievodstva> (accessed: 10.06.2023) [in Russian]
3. Nichiporovich A. A. O putyakh povysheniya produktivnosti fotosinteza rastenij v posevah [On Ways to Increase the Productivity of Plant Photosynthesis in Crops] / A. A. Nichiporovich // Fotosintez i voprosy produktivnosti rastenij [Photosynthesis and Questions of Plant Productivity]. — M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1963. — P. 5–36. [in Russian]
4. Statisticheskoe modelirovanie i prognozirovaniye: ucheb. posobie [Statistical Modeling and Forecasting: study guide] / Ed. A.G. Granberg. — M.: Finance and Statistics, 2000. — 383 p. [in Russian]
5. Polevoy A.N. Prikladnoye modelirovanie i prognozirovaniye produktivnosti posevov [Applied Modeling and Forecasting of Crop Productivity] / A.N. Polevoy. — L.: Gidrometeoizdat, 1988. — 320 p. [in Russian]
6. Kolbina O.N. Cifrovizatsiya sel'skohozyajstvennoj otrasli [Digitalization of the Agricultural Industry] / O.N. Kolbina, N.V. Yagotintseva, T.V. Safonova [et al.] // Nauchnye izvestiya [Scientific News]. — 2022. — No. 29. — P. 148-151. [in Russian]
7. Russkin V.D. Ispol'zovanie cifrovyyh dvoynikov v krupnom proizvodstve [The Use of Digital Twins in Large-scale Production] / V.D. Russkin, T.V. Safonova // Informacionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo [Information Technologies and Systems: Management, Economics, Transport, Law]. — 2022. — No. 3 (43). — pp.51-57. [in Russian]
8. Bulgakova A.V. Primenenie cifrovyyh dvoynikov v stroitel'noy otrasli [The Use of Digital Twins in the Construction Industry] / A.V. Bulgakova, T.V. Safonova // Informacionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo [Information Technologies and Systems: Management, Economics, Transport, Law]. — 2022. — No. 3 (43). — pp.19-23. [in Russian]
9. Allen R.G. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 / R.G. Allen [et al.] // FAO, Rome. — 1998 — Vol. 300, no. 9.
10. Meissner R. Measurement of Dew, Fog, and Rime with a High Precision Gravitation Lysimeter / R. Meissner [et al.] // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. — 2007 — Vol.170, no. 3 — P. 335–344.
11. Efimov A.E. Monitoring evapotranspiratsii na sel'skohozyajstvennom pole, opredelenie norm i srokov poliva avtomatizirovannym mobil'nym polevym agrometeorologicheskim kompleksom [Monitoring of Evapotranspiration in an Agricultural Field, Determination of Norms and Terms of Irrigation by an Automated Mobile Field Agrometeorological Complex] / A.E. Efimov, Yu.R. Sitdikova, A.V. Dobrokhotov [et al.] // Vodnye resursy [Water Resources]. — 2018. — Vol.45. — No. 1. — P.100-105. [in Russian]
12. Dobrokhotov A.V. Opredelenie prostranstvennogo raspredeleniya summarnoy radiatsii v zavisimosti ot tipov i kolichestva oblachnosti s ispol'zovaniem dannykh faktora mutnosti Linke i cifrovoj modeli rel'efa [Determination of the Spatial Distribution of Total Radiation Depending on the Types and Amount of Cloudiness Using Data from the Linke Turbidity Factor and a Digital Elevation Model] / A.V. Dobrokhotov // Vestnik SGUTiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologij) [Bulletin of SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)]. — 2018. — Vol.23. — №4. — P. 33-45 [in Russian]