

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.674:631.17

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-1-18

Методологические инструменты управления орошением с искусственным интеллектом

Михаил Николаевич Лытов

Волгоградский филиал Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Волгоград, Российская Федерация, LytovMN@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

Аннотация. **Цель:** разработка концепта систем управления орошением с интегрированными технологиями искусственного интеллекта. **Материалы и методы.** Рабочей гипотезой исследований стало предположение о приоритете кластерного применения технологий искусственного интеллекта в решении актуальных задач управления орошением. При этом основу информационно-вычислительного блока системы управления орошением должны составлять детерминированные алгоритмы с использованием проверенных практикой решений. **Результаты.** В рамках предлагаемого концепта нейронная сеть может быть положена в основу решения задачи, а может использоваться лишь для адаптации параметров используемых моделей. Точки соприкосновения традиционных, детерминированных – аналитических систем управления орошением и технологий искусственного интеллекта определяются необходимостью адаптации параметров, точной настройки коэффициентов используемого методологического инструментария. При этом сфера применения искусственного интеллекта в решении задач управления орошением довольно широка. Технологии искусственного интеллекта могут использоваться для решения задач планирования и оперативного управления орошением, распознавания образов при спутниковом контроле влажности почвы, интерполяции данных о влажности почвы по площади, прогнозирования профиля увлажнения почвы. Исследованиями разработан алгоритм, использующий технологии искусственного интеллекта для повышения надежности прогноза суммарного водопотребления орошаемых культур в региональном и ландшафтном аспекте. Предложенный алгоритм позволяет системе самообучаться и уточнять региональные значения биоклиматических коэффициентов с учетом совокупного влияния местных факторов. **Выводы:** разработан концепт и предложены новые научные подходы, которые позволяют эффективно решать задачу адаптации параметров методологического инструментария управления орошением на уровне орошаемого поля, и даже с учетом внутрислоевого вариабельности.

Ключевые слова: управление орошением, искусственный интеллект, области применения, способы интеграции, нейронная сеть

Для цитирования: Лытов М. Н. Методологические инструменты управления орошением с искусственным интеллектом // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 1–18. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-1-18>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Methodological management tools of irrigation with artificial intelligence

Mikhail N. Lytov

Volgograd branch of A. N. Kostyakov All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Volgograd, Russian Federation, LytovMN@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

Abstract. Purpose: to develop the concept of irrigation management systems using integrated artificial intelligence technologies. **Materials and methods.** The working hypothesis of the research was the assumption of the priority of the cluster application of artificial intelligence technologies in solving urgent problems of irrigation management. At the same time, the basis of the information-computing unit of the irrigation control system should be deterministic algorithms using proven solutions. **Results.** Within the framework of the proposed concept, a neural network can be used as the basis for solving a problem, or it can only be used to adapt the parameters of the models used. The impact points of traditional, deterministic - analytical irrigation management systems and artificial intelligence technologies are determined by the need to adapt parameters, fine-tune the coefficients of the methodological tools used. At the same time, the scope of application of artificial intelligence in solving problems of irrigation management is quite wide. Artificial intelligence technologies can be used to solve the problems of irrigation planning and operational management, image recognition in satellite monitoring of soil moisture, interpolation of soil moisture data by area, forecasting the soil moisture profile. An algorithm using artificial intelligence technologies to improve the reliability of forecasting the total water consumption of irrigated crops in the regional and landscape aspect is developed by research. The proposed algorithm allows the system to self-learn and refine the regional values of bioclimatic coefficients, with respect to cumulative influence of local factors. **Conclusions:** a concept has been developed and new scientific approaches have been proposed to effectively solve the problem of adapting the parameters of methodological irrigation management tools at the level of an irrigated field, and even taking into account intra-field variability.

Keywords: irrigation management, artificial intelligence, areas of application, integration methods, neural network

For citation: Lytov M. N. Methodological management tools of irrigation with artificial intelligence. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(2):1–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-1-18>.

Введение. Динамичное расширение рынка интеллектуальных технологий стало одним из основных трендов в сфере технологий последнего десятилетия [1–5]. Искусственный интеллект все больше входит в нашу повседневную жизнь, замещая функции, ранее принадлежащие исключительно человеку. Искусственный интеллект сегодня – это и NLP-технологии, лежащие в основе цифрового анализа и синтеза речи, обеспечивающие прямое общение машины и человека, и технологии компьютерного зрения, которые сегодня не только предполагают распознавание визуальных образов, но и с успехом используются для отслеживания и классификации объектов; искусственный интеллект применяется для эффективного решения

препроцессорных задач в вычислительных машинах, роботизированных устройствах современных автомобилей, при создании экспертных систем и ассистентов, в решении всего многообразия задач управления и поддержки принятых решений. Технологии искусственного интеллекта сулят большие преимущества в развитии технологий самых разных отраслей народного хозяйства. Но сегодня это еще и «модный» продукт, что зачастую позволяет активно и успешно продвигать технологию, не замечая ее недостатков. Современные продукты искусственного интеллекта базируются преимущественно на использовании нейронной сети. А это и проблемы переобучения, когда машина просто «запоминает» нужный ответ, никак не оценивая закономерности [6, 7]. И проблема так называемого «черного ящика», предполагающая практическую невозможность разобраться, на основании чего «сеть» сформировала тот или иной ответ [8]. И проблема работы в динамических средах, когда сегодня успешно работающая «сеть» в новых сложившихся условиях может перестать отвечать элементарным требованиям [9]. Эти, а также ряд других хорошо известных сегодня проблем делают принципиальной возможность получения ошибочного решения при использовании любого интеллектуального алгоритма. И если в одних задачах, например, при общении с виртуальными ассистентами, ботами или при распознавании изображения текстовых символов – такие ошибки неприятны, но допустимы, то в других задачах они могут привести к серьезным технологическим, экономическим, социальным проблемам и даже человеческим «жертвам». Поэтому разработка интеллектуальных технологий для применения в отраслевых секторах народного хозяйства была и остается актуальнейшей проблемой современности. Цель настоящего исследования – разработка концептуальных подходов создания автоматизированных систем управления орошением с интегрированными технологиями искусственного интеллекта.

Материалы и методы. Рабочей гипотезой исследований стало пред-

положение о приоритете кластерного применения технологий искусственного интеллекта в решении актуальных задач управления орошением. Сегодня делаются попытки использования технологий искусственного интеллекта для управления орошением с представлением в формате монозадачи [4, 10]. Решения принимаются нейронной сетью на основе многообразия исходных данных, причем, как было принято то или иное управляющее решение, остается «тайной». Это пример прямого проецирования технологий искусственного интеллекта в решение проблемы управления орошением. При этом не учитывается наработанный опыт алгоритмизации в решении задач управления орошением, не используются известные и хорошо зарекомендовавшие себя аналитические методы, научные достижения в области физического и имитационного моделирования процессов. Предполагается, что нейронная сеть заместит все эти функции, имея на входе совокупность исходных данных и на выходе – готовое управляющее решение. Такой подход нам видится чрезмерно оптимистичным. Кластерный подход, когда технологии искусственного интеллекта используются для решения какого-то конкретного кластера проблемы – частной задачи, нам видится более перспективным. При этом предполагается безусловное преимущество технологии искусственного интеллекта перед ранее используемыми способами решения задач внутри выбранного кластера. В кластерах, где предположение о преимуществе технологии искусственного интеллекта не имеет под собой основания, ее использование признается нецелесообразным.

Ключевой характеристической особенностью технологий искусственного интеллекта является способность к самообучению [11, 12]. В нейронной сети эта способность реализована путем подбора весовых коэффициентов к синапсам с использованием данных обучающей выборки. Это крайне важная особенность технологии, позволяющая проводить обучение как с нуля, так и в плане адаптации системы к новым, изменив-

шимся условиям. Поэтому в рамках кластеризации задач управления орошением предполагается выделить такие, свойство адаптации для которых наиболее важно. При этом нейронная сеть может быть положена в основу решения задачи, а может использоваться лишь для адаптации параметров ранее используемых или вновь предложенных моделей. При этом предпочтение следует отдавать последним, так как в этом случае гораздо больше вариантов компенсации влияния ошибок «сети» на принятое в итоге управляющее решение.

Результаты и обсуждение. Управление орошением – это комплексная задача и, вообще говоря, такое собирательное понятие, которое объединяет реализацию множества функций. Основная функция орошения – поддержание оптимального водного режима почвы посредством распределения дополнительного источника влаги – оросительной воды. Собственно, эту функцию нельзя сейчас считать единственной, так как орошение используется в качестве транспортной функции: для доставки питательных элементов в прикорневую зону растений, для внесения мелиорантов, обработки средствами защиты растений, может использоваться для регулирования микроклимата агрофитоценоза; в настоящее время разрабатываются гидромелиоративные технологии комплексной протекции посевов от климатических рисков [13]. Управление орошением – это технология и метод принятия решений, оказывающих непосредственное влияние на то, как эта функция будет реализована. Методология управления орошением имеет свой инструментарий, который в общем случае использует (рисунок 1):

- методы физических сенсоров и средств дескриптивной аналитики. Довольно динамично в настоящем развивающийся, хотя и весьма затратный, инструмент управления орошением. Предполагает организацию сети датчиков, расположенных по определенной схеме и обеспечивающих периодический съем информации о контролируемых показателях. Средства дескриптивной аналитики позволяют контролировать процесс и отследить

наступление критических фаз, когда необходимо принятие того или иного управляющего решения;

- метод логических алгоритмов и предиктивной аналитики. Стандартные, в достаточной мере разработанные и апробированные инструменты управления орошением. Предполагает проведение определенным образом организованных вычислений с использованием известных аналитических моделей. Алгоритмы позволяют учитывать динамику контролируемых показателей, использующихся в качестве факторов – критериев управления, а также рассматривать их во взаимосвязи с параметрами окружающей среды. Средства предиктивной аналитики позволяют прогнозировать динамику развития процессов и планировать управляющие действия на перспективу;

- методы физического и имитационного моделирования. Данные инструменты позволяют моделировать развитие процессов на орошаемом участке. В зависимости от вектора развития процессов, его качественного и количественного состояния вырабатывается суждение о необходимости совершения какого-либо управляющего действия. Определяются параметры и объемы необходимого действия;

- методы вероятностного прогноза развития процессов. Мелиорируемые земли как продукт сложного синтеза природного объекта и инженерных комплексов характеризуются высокой стохастикой развития процессов. Процессы, как правило, определяются совокупностью факторов, учет которых является весьма сложной задачей, лишь отчасти решаемой методами физического и имитационного моделирования. Часто не все из совокупности факторов контролируются, что также повышает стохастичность процессов. Использование в этом случае вероятностных методов прогноза является вполне оправданным, по крайней мере, на местном региональном уровне.

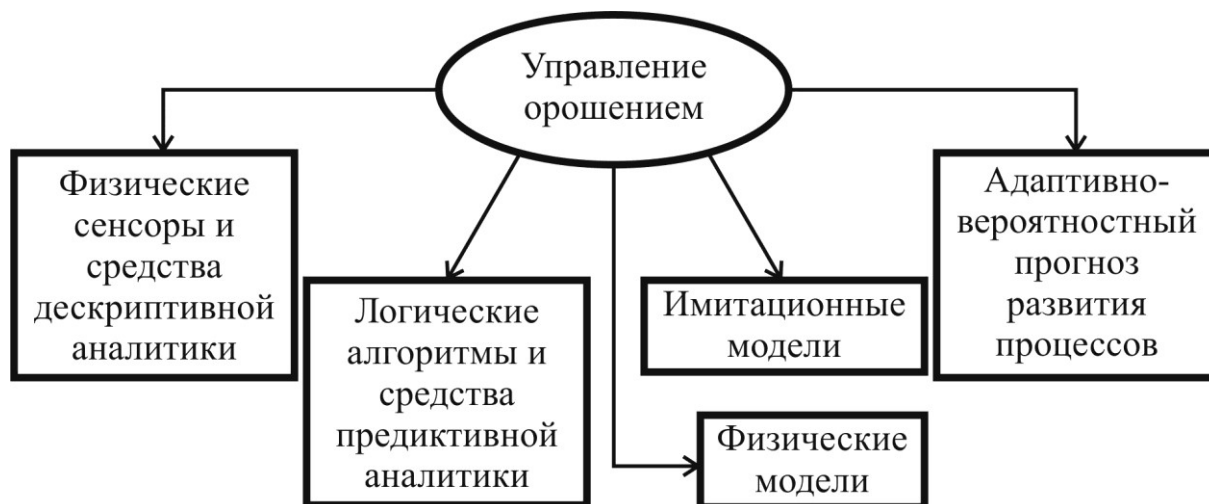


Рисунок 1 – Методологические инструменты управления орошением

Figure 1 – Methodological tools of irrigation management

Где же в этом инструментарии место для технологий искусственного интеллекта? На рисунке 2 предложена концептуальная схема управления орошением, где сделана попытка определить точки соприкосновения известных, апробированных методов и искусственного интеллекта.

Функция управления орошением рассматривается в непосредственном отношении к объекту управления – агрофитоценозу и среде, характеризующейся совокупностью условий, в которых развивается агрофитоценоз. Реализация функции управления начинается с постановки задач, которые решает орошение на данном конкретном мелиорированном участке. Основная задача – это формирование оптимального водного режима почвы, но, как уже говорилось, она не единственная.

На основе поставленных задач разрабатываются целевые функции и граничные условия управления орошением. На этом этапе выбираются критерии эффективности управления, а также та допустимая область, в рамках которой осуществляется деятельность. Далее подключается методологический инструментарий управления орошением.

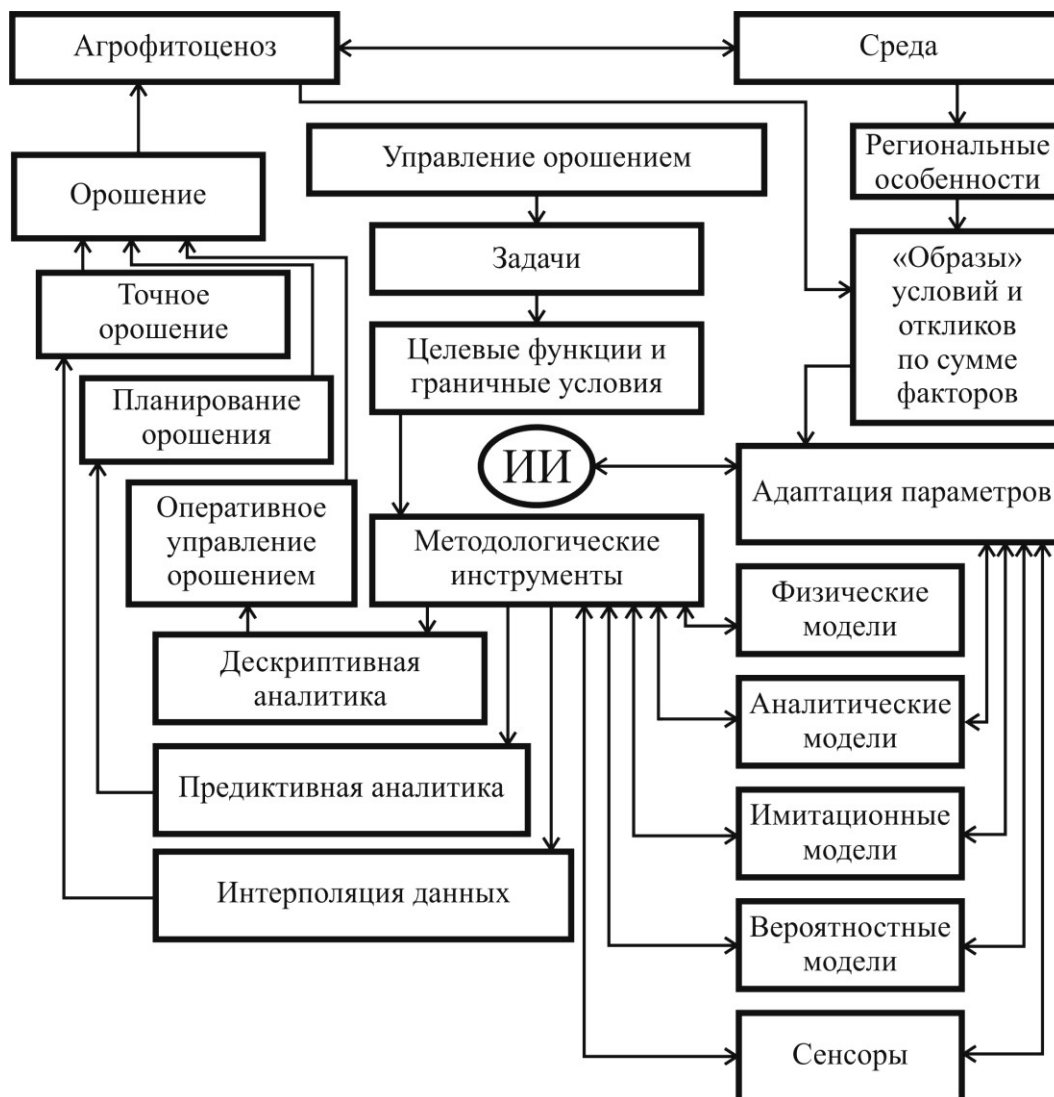


Рисунок 2 – Концепт управления орошением с интегрированными технологиями искусственного интеллекта
Figure 2 – Irrigation management concept with integrated artificial intelligence technologies

Вовлекаемые в процесс выполнения функции управления инструменты решают разные задачи и различными способами. Они позволяют физически контролировать некоторые параметры, имеющие непосредственное отношение к управлению орошением, прогнозировать развитие процессов во времени, вести аналитику, определять потребность и объемы орошения. Однако большинство этих инструментов и те основные, без которых функция управления не представляется возможной либо видится существенно ограниченной, – все эти инструменты имеют определенный

адаптационный диапазон. Они имеют такие настраиваемые параметры, коэффициенты, которые позволяют им адекватно работать в различных региональных и динамично меняющихся условиях среды. Такие – адаптируемые – параметры имеют и физические модели, и имитационные, и аналитические, и тем более вероятностные. Настраиваемые в конкретных региональных условиях коэффициенты имеют методы интерполирования данных по площади, средства дистанционного мониторинга, а также их комбинации с различными сенсорными сетками. Настраиваемые коэффициенты имеют модели переноса тепла и влаги, которые лежат в основе управления микроклиматом агрофитоценоза. Адаптируемые к региональным условиям параметры имеют модели водопотребления сельскохозяйственных культур и т. д. Подбор верных значений таких параметров – работа весьма трудоемкая и ресурсозатратная. Некоторые из них получили усредненные значения для крупных почвенно-климатических регионов, значения других предлагается определять методом аналогий, третьи определены для конкретных условий и являются лишь приблизительным ориентиром, что, конечно же, снижает надежность используемых инструментов.

Сегодня задача адаптации параметров методологического инструментария управления орошением ставится в отношении конкретного орошаемого участка – орошаемого поля и даже с учетом внутрислоевой вариативности. Решается эта задача на стыке региональных факторов окружающей среды, реальных природных процессов и используемых для их предсказания методологических инструментов. Выделяются региональные особенности, имеющие значение для решения задачи, по сумме факторов окружающей среды формируются «образы» условий – мгновенные слепки сочетания факторов, которые можно сопоставить со значениями какого-либо из моделируемых инструментом показателей. Эти «образы», моделируемые и реальные значения показателей как раз и используются для уточнения региональных параметров методологического инструмента-

рия. Подчеркнем, что определение «региональные» здесь не совсем верно, так как речь идет о возможности большей степени дифференцирования – по агроландшафтной единице, и даже на уровне орошаемого поля.

Вот как раз эта работа – уточнение региональных (агроландшафтных, внутриполевых) параметров методологического инструментария – может проводиться в автоматическом режиме, без участия человека. И помочь в этом может искусственный интеллект. Его способность к самообучению здесь как нельзя кстати. Ну а возможные ошибки, некорректные решения нейронной сети могут быть предотвращены ограничениями по совокупности требований к уточняемым параметрам методологического инструментария. Таким образом, необходимость адаптации параметров, точной настройки коэффициентов в используемых для управления орошением инструментах и определяет область применения технологий искусственного интеллекта.

Искусственный интеллект может быть использован (рисунок 3):

- для решения задач планирования орошения. Например, задача планирования проведения поливов и сейчас остается актуальной для определения очередности орошения участков, подключения элементов оросительной сети и т. д. Планирование орошения всегда осуществлялось с учетом региональных природных особенностей, учитывало особенности регионального климата, водоудерживающую способность и окультуренность почв, опасность развития ирригационной эрозии. Искусственный интеллект обеспечит учет всего многообразия факторов при принятии управляющих решений;

- решения задач оперативного управления орошением. Сегодня все большую популярность приобретает технология управления поливами по сенсорам. Однако технология и сегодня остается достаточно дорогостоящей и недоступной для повсеместного применения. Тем не менее имеющаяся сенсорная сеть может быть использована и для интерполирования

управляющих решений на территории, где датчики не установлены. Нужно ли говорить, что для решения этой задачи необходимо учесть все многообразие условий, сопоставить множество факторов. И лучшим решением здесь также видится использование технологий искусственного интеллекта;

- распознавания образов при спутниковом контроле влажности почвы. Оценить содержание влаги в почве, обеспеченность влагой растений в сельскохозяйственных посевах по спектру радиоволн, излучаемых и отражаемых поверхностью мелиорированного участка, – очень привлекательная идея. Оценка даже по одному снимку может охватывать большие территории, при этом учитывается вся вариабельность водообеспеченности на уровне пикселя. Разработке таких технологий уделялось и сейчас уделяется очень много внимания. Однако точность прогнозов содержания влаги в почве по спутнику пока оставляет желать лучшего. И проблема здесь в необходимости учета множества факторов, которые влияют на «светимость» участка, а также соотношения их с реальными данными о содержании почвенной влаги. Нейронная сеть даже по относительно разреженной сенсорной сетке в течение определенного времени может собрать достаточно информации для обучения и последующего прогноза уровня водообеспечения на основании данных спектральных космоснимков;

- интерполяции данных о влажности почвы по площади. Решение этой задачи является фундаментом точного орошения. Искусственный интеллект позволит учитывать при решении этой задачи все многообразие факторов, таких как вариабельность почвенных условий, рельеф и микро-рельеф, состояние посевов и т. д.;

- прогноза распределения влаги по профилю почвы. Физиология растений позволяет компенсировать недостаток влаги на одном из участков почвенного профиля повышенным влагоотбором на другом. Поэтому проблеме до настоящего времени не уделялось должного внимания. Однако если речь идет не о выживании растений, а о создании наилучших условий

для формирования наибольшей продуктивности и урожая наилучшего качества, то проблему распределения влаги по профилю почвы следует учитывать. В реальной практике дифференцирование влагосодержания по профилю почвы довольно распространено, тогда как в орошаемом земледелии во внимание принимаются только средние запасы влаги для расчетного слоя. Учет профиля распределения влаги позволяет существенно активизировать продукционный процесс и получать больший эффект от орошения. Расчетные модели прогнозирования распределения влаги по профилю имеют адаптационные параметры, учитывающие физику почвы и то, как эти факторы влияют на фильтрацию. Для уточнения значений этих параметров в конкретных почвенных условиях может с успехом использоваться искусственный интеллект.

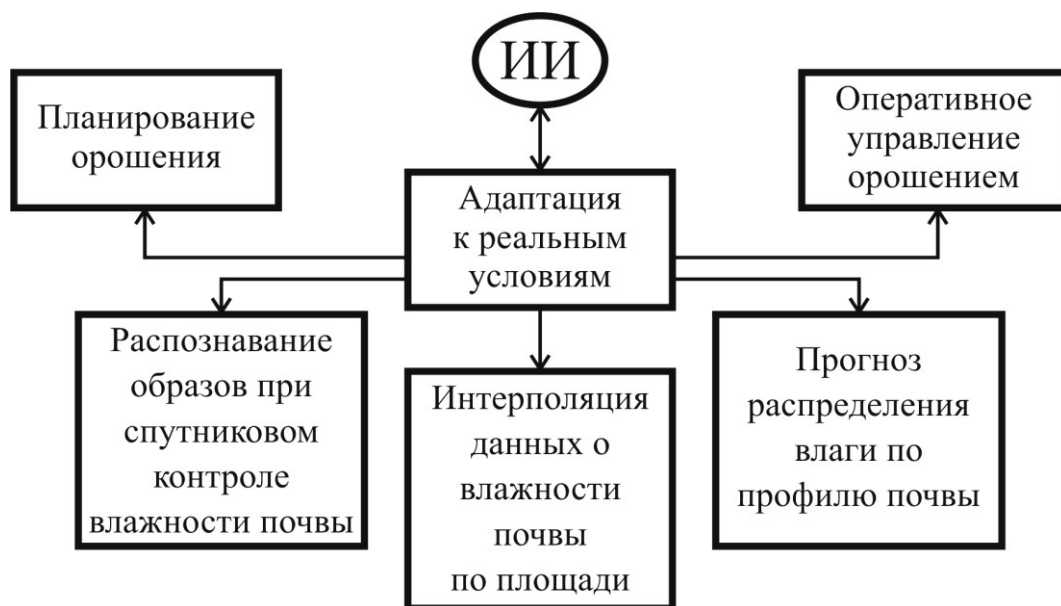


Рисунок 3 – Сфера применения технологий искусственного интеллекта в решении задач управления орошением

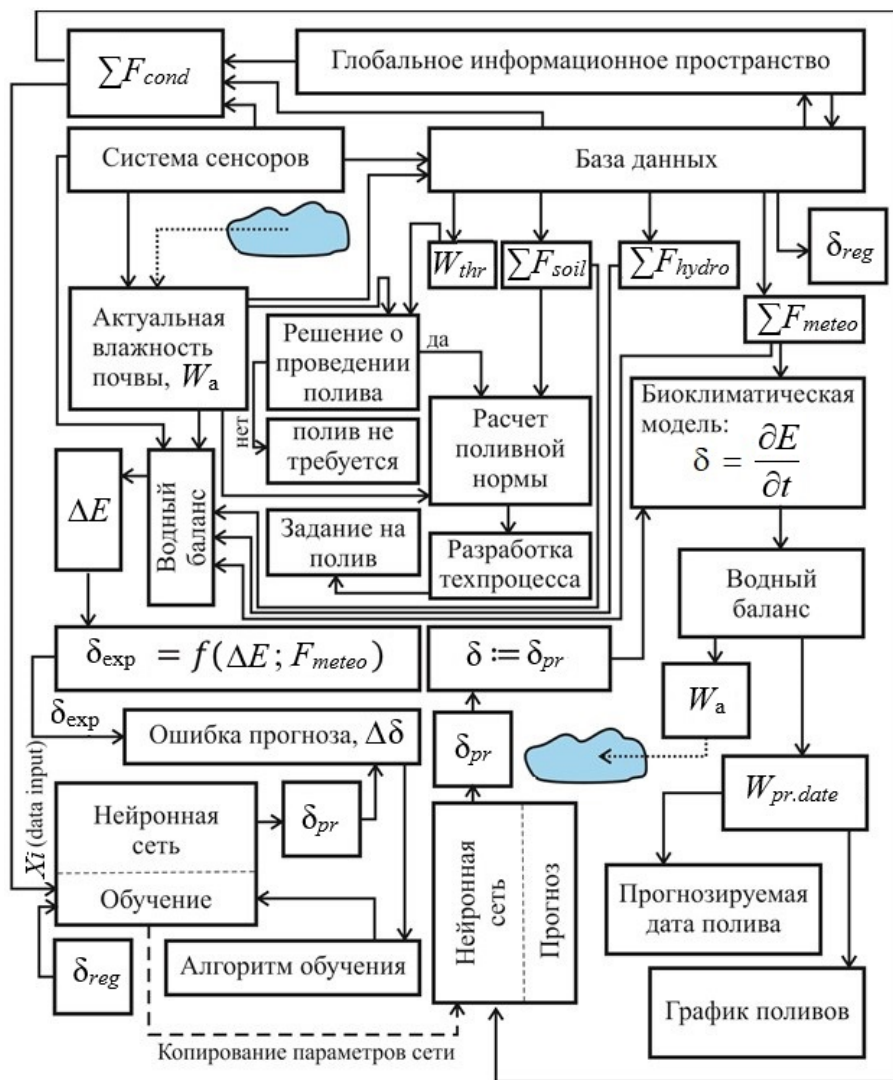
Figure 3 – Scope of application of artificial intelligence technologies in solving irrigation management problems

Таким образом, технологии искусственного интеллекта могут получить самое широкое применение в различных задачах управления орошением. Приведем в качестве примера алгоритм решения одной из таких задач.

На рисунке 4 приведен алгоритм определения потребности в прове-

дении поливов с интегрированной нейронной сетью [14]. Входными данными алгоритма являются результаты физических измерений (сенсоры), специальным образом организованная база данных, а также глобальное информационное пространство, позволяющее полнее оценить систему факторов влияния, в разной степени определяющих динамику суммарного водопотребления. Предложенный алгоритм является гибридным, включает возможность определения потребности в поливах по сенсорам и на основе расчетов. Не будем пока рассматривать последовательность назначения поливов по сенсорам и рассмотрим подробнее аналитику алгоритма. Количественная оценка актуальной влажности почвы осуществляется на основе решения уравнения водного баланса. Расчет, как правило, ведется на перспективу, с использованием прогнозной агрометеорологической информации, и тогда влажность почвы определяется на какую-то прогнозную дату. Может также использоваться и ретроспективная агрометеорологическая информация, и тогда расчетом определяется актуальная влажность почвы. Данные об актуальной влажности передаются в модуль принятия решений о необходимости проведения полива. При проведении прогнозных расчетов определяется прогнозная дата поливов, может быть составлен и оптимизирован график поливов для орошаемого массива.

В основу расчетов аналитического сегмента алгоритма положена биоклиматическая модель суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур, опирающаяся на один, наиболее легко прогнозируемый агрометеопараметр. Наиболее надежные прогнозы сегодня можно получить по температуре воздуха, но могут быть использованы и другие метеопараметры, для которых определены региональные значения биоклиматических коэффициентов (δ_{reg}). Предложенный алгоритм позволяет системе самообучаться и уточнять региональные значения биоклиматических коэффициентов с учетом совокупного влияния местных факторов.



14

Условные обозначения:

ΣF_{cond} – совокупность внешних факторов, во взаимосвязи формирующих образ среды, в которой размещается агрофитоценоз; ΣF_{soil} – совокупность почвенных факторов на локализованном участке ландшафта – в области интереса системы управления (поле, фация, урочище); ΣF_{hydro} – совокупность факторов, характеризующих гидрологические условия области интереса; ΣF_{meteo} – совокупность факторов, характеризующих метеорологические условия; W_{thr} – порог предполивной влажности почвы, %; δ_{reg} – региональные значения биоклиматических коэффициентов, мм/°С; δ_{exp} – значения биоклиматических коэффициентов, определенные по экспериментальным данным, мм/°С; δ_{pr} – значения биоклиматических коэффициентов, прогнозируемые нейронной сетью, мм/°С; ΔE , ∂E – суммарное водопотребление культуры за расчетный отрезок времени, мм; ∂t – сумма суточных температур воздуха за расчетный период, °С; W_a – актуальная влажность почвы, %; $W_{pr.date}$ – влажность почвы на прогнозную дату, %

Legend:

ΣF_{cond} – a set of external factors that form the environment image in context in which the agrophytocenosis is located; ΣF_{soil} – is a set of soil factors in a localized area of the landscape – in the area of interest of the management system (field, facies, tract); ΣF_{hydro} – is a set of factors characterizing the hydrological conditions of the area of interest; ΣF_{meteo} – is a set of factors characterizing meteorological conditions; W_{thr} – pre-irrigation soil moisture sill, %; δ_{reg} – regional values of bioclimatic coefficients, mm/°C; δ_{exp} – values of bioclimatic coefficients determined by experimental data, mm/°C; δ_{pr} – values of bioclimatic coefficients predicted by the neural network, mm/°C; ΔE , ∂E – crop total water consumption for the estimated period of time, mm; ∂t – the sum of daily air temperatures for the estimated period, °C; W_a – actual soil moisture, %; $W_{pr.date}$ – soil moisture for the predicted date, %

Рисунок 4 – Алгоритм определения потребности в проведении поливов с интегрированной нейронной сетью

Figure 4 – Algorithm for determining the need for irrigation with an integrated neural network

Для обучения системы в алгоритме предполагается использование сенсорной информации об актуальной влажности почвы. Наряду с этим используется метеорологическая, гидрологическая информация, данные о свойствах почвы, источником которых может быть база данных, глобальное информационное пространство, сенсоры. Указанная информация используется для составления уравнения водного баланса, решение которого позволяет получить фактические значения суммарного водопотребления и уточнить биоклиматические коэффициенты. Полученные таким образом значения биоклиматических коэффициентов фактически являются действительными на фоне совокупного влияния комплекса факторов, определяющих мгновенный (сложившийся) образ условий, сложившихся на орошаемом участке. Данные об этом комплексе факторов наряду с действительными оценками биоклиматических коэффициентов используются для обучения нейронной сети. Последняя при наработке достаточного объема данных обучается сама прогнозировать уточненные значения биоклиматических коэффициентов, с учетом совокупного действия факторов влияния, уже на любой расчетный период, а также с возможностью распространения на сходные по условиям орошаемые агроландшафты.

Параметры обученной нейронной сети копируются в рабочий модуль искусственного интеллекта системы, который и отвечает за выработку уточненных значений биоклиматических коэффициентов (δ_{pr}). Адаптированные на местности биоклиматические коэффициенты замещают использование региональных биоклиматических коэффициентов, благодаря чему точность решений биоклиматической модели, а следовательно и прогнозов, может быть существенно повышена.

Выводы. Технологии искусственного интеллекта являются перспективным вектором развития информационных систем управления орошением. На современном уровне развития таких технологий предпочтительна кластерная интеграция искусственного интеллекта с сохранением логиче-

ской структуры, аналитики и других методологических инструментов управления орошением. Точки соприкосновения традиционных, аналитических систем управления орошением и искусственного интеллекта определяются необходимостью адаптации параметров, точной настройки коэффициентов используемого методологического инструментария. При этом сфера применения искусственного интеллекта в решении задач управления орошением довольно широка. Технологии искусственного интеллекта могут использоваться для решения задач планирования и оперативного управления орошением, распознавания образов при спутниковом контроле влажности почвы, интерполяции данных о влажности почвы по площади, прогнозирования профиля увлажнения почвы. Предложен алгоритм, использующий технологии искусственного интеллекта для повышения надежности прогноза суммарного водопотребления орошаемых культур в региональном и ландшафтном аспекте.

Список источников

1. Некоторые прикладные аспекты использования искусственного интеллекта / А. Ю. Близневский, В. С. Близневская, В. П. Клочков, М. Ю. Швецов, Т. И. Осина // Журнал Министерства народного просвещения. 2022. № 9(2). С. 53–62. DOI: 10.13187/zhmnpr.2022.9.53.
2. Ефанов В. А. Цифровая трансформация системы управления бизнес-процессами хозяйствующего субъекта // Экономика устойчивого развития. 2022. № 2(50). С. 76–81. DOI: 10.37124/20799136_2022_2_50_76.
3. Звягин Л. С. Вопросы применения искусственного интеллекта и измерений в современном агросекторе // Мягкие измерения и вычисления. 2022. Т. 50, № 1. С. 63–76. DOI: 10.36871/2618-9976.2022.01.007.
4. Comparing the performance of neural network and deep convolutional neural network in estimating soil moisture from satellite observations / L. Ge, R. Hang, Y. Liu, Q. Liu // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. 1327. <https://doi.org/10.3390/rs10091327>.
5. Artificial neural networks to estimate soil water retention / F. C. Soares, A. D. Robaina, M. X. Peiter, J. L. Russi, G. A. Vivan // Ciencia Rural. 2014. Vol. 44, № 2. P. 293–300. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000200016>.
6. Бади́ка Е. М., Марченков З. В. Влияние параметров на переобучение нейронных сетей // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 11-12(79). С. 46–52.
7. Пырнова О. А., Зарипова Р. С. Методы и проблемы переобучения многослойной нейронной сети // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2020. № 2(20). С. 101–102.
8. Исаков Р. В. Технология анализа синапсов нейронной сети для исследования

входных признаков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2020. Т. 22, № 3. С. 45–55. DOI: 10.18127/j19998554-202003-05.

9. Леметюйнен Ю. А. Основные проблемы применения нейронных сетей для моделирования биотехнологических процессов // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 12-2(68). С. 68–72.

10. Модель интеллектуальной системы управления оросительным комплексом / Д. А. Соловьев, Г. Н. Камышова, Д. А. Колганов, Н. Н. Терехова // Аграрный научный журнал. 2021. № 2. С. 103–108. <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i2pp103-108>.

11. Измакова О. А. Рандомизированные алгоритмы самообучения для нейронных сетей // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2005. № 2. С. 122–144.

12. Разновидности архитектур нейронных сетей / И. А. Клоков, В. А. Сухотерин, Д. А. Клаинцев, Д. А. Вилежанинов // Символ науки. 2023. № 1-2. С. 21–22.

13. Лытов М. Н. Целевые функции компенсации климатических рисков возделывания сельскохозяйственных культур при комплексном использовании гидротехнических мелиораций // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 4. С. 67–85. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1313> (дата обращения: 15.02.2023). DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-67-85.

14. Borodychev V. V., Lytov M. N. Irrigation management information system model with integrated elements of artificial intelligence // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 786. 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/786/1/012019.

References

1. Bliznevsky A.Yu., Bliznevskaya V.S., Klochkov V.P., Shvetsov M.Yu., Osina T.I., 2022. *Nekotorye prikladnye aspekty ispol'zovaniya iskusstvennogo intellekta* [Some applied aspects of using artificial intelligence]. *Zhurnal Ministerstva narodnogo prosveshcheniya* [Journal of the Ministry of National Education], no. 9(2), pp. 53-62, DOI: 10.13187/zhmnp.2022.9.53. (In Russian).

2. Efanov V.A., 2022. *Tsifrovaya transformatsiya sistemy upravleniya biznes-protsessami khozyaystvuyushchego sub"ekta* [Digital transformation of the business process management system of a business subject]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of Sustainable Development], no. 2(50), pp. 76-81, DOI: 10.37124/20799136_2022_2_50_76. (In Russian).

3. Zvyagin L.S., 2022. *Voprosy primeneniya iskusstvennogo intellekta i izmereniy v sovremennom agrosektore* [Questions of the use of artificial intelligence and measurements in the modern agricultural sector]. *Myagkie izmereniya i vychisleniya* [Soft Measurements and Computing], vol. 50, no. 1, pp. 63-76, DOI: 10.36871/2618-9976.2022.01.007. (In Russian).

4. Ge L., Hang R., Liu Y., Liu Q., 2018. Comparing the performance of neural network and deep convolutional neural network in estimating soil moisture from satellite observations. *Remote Sensing*, vol. 10, 1327, <https://doi.org/10.3390/rs10091327>.

5. Soares F.C., Robaina A.D., Peiter M.X., Russi J.L., Vivan G.A., 2014. Artificial neural networks to estimate soil water retention. *Ciencia Rural*, vol. 44, no. 2, pp. 293-300, <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000200016>.

6. Badika E.M., Marchenkov Z.V., 2021. *Vliyanie parametrov na pereobucheniye neyronnykh setey* [Influence of parameters on retraining of neural networks]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire* [Actual Scientific Research in the Modern World], no. 11-12(79), pp. 46-52. (In Russian).

7. Purnova O.A., Zaripova R.S., 2020. *Metody i problemy pereobucheniya mnogosloynnoy neyronnoy seti* [Methods and problems of retraining a multilayer neural network]. *Informatsionnye tekhnologii v stroitel'nykh, sotsial'nykh i ekonomicheskikh sistemakh* [Information Technologies in Construction, Social and Economic Systems], no. 2(20), pp. 101-102. (In Russian).

8. Isakov R.V., 2020. *Tekhnologiya analiza sinapsov neyronnoy seti dlya issledovaniya vkhodnykh priznakov* [Technology of analysis of neural network synapses for the study of input features]. *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputers: Development, Application], vol. 22, no. 3, pp. 45-55, DOI: 10.18127/j19998554-202003-05. (In Russian).

9. Lemetyuinen Yu.A., 2020. *Osnovnye problemy primeneniya neyronnykh setey dlya modelirovaniya biotekhnologicheskikh protsessov* [The main problems of using neural networks for modeling biotechnological processes]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire* [Actual Scientific Research in the Modern World], no. 12-2(68), pp. 68-72. (In Russian).

10. Soloviev D.A., Kamyshova G.N., Kolganov D.A., Terekhova N.N., 2021. *Model' intellektual'noy sistemy upravleniya orositel'nym kompleksom* [Model of an intelligent control system for an irrigation complex]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 2, pp. 103-108, <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i2pp103-108>. (In Russian).

11. Izmakova O.A., 2005. *Randomizirovannyye algoritmy samoobucheniya dlya neyronnykh setey* [Randomized self-learning algorithms for neural networks]. *Differentsial'nye uravneniya i protsessy upravleniya* [Differential Equations and Control Processes], no. 2, pp. 122-144. (In Russian).

12. Klokov I.A., Sukhoterin V.A., Klaintsev D.A., Vilezhaninov D.A., 2023. *Raznovidnosti arkhitektur neyronnykh setey* [Varieties of neural network architectures]. *Simvol nauki* [Symbol of Science], no. 1-2, pp. 21-22. (In Russian).

13. Lytov M.N., 2022. [Goal functions of climatic risks compensation of cultivation of agricultural crops in the complex use of hydrotechnical reclamation]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 12, no. 4, pp. 67-85, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1313> [accessed 15.02.2023], DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-67-85. (In Russian).

14. Borodychev V.V., Lytov M.N., 2021. Irrigation management information system model with integrated elements of artificial intelligence. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 786, 012019, DOI: 10.1088/1755-1315/786/1/012019.

Информация об авторе

М. Н. Лытов – ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности директора филиала, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент.

Information about the author

M. N. Lytov – Leading Researcher, Acting Director of the Branch, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor.

Автор несет ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

The author is responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.02.2023; одобрена после рецензирования 30.03.2023; принята к публикации 25.04.2023.

The article was submitted 27.02.2023; approved after reviewing 30.03.2023; accepted for publication 25.04.2023.