



О необходимости трансформации парадигмы научных исследований в области земледелия (*сообщение первое*)

✉ Каличкин В.К.

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук
Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

✉ e-mail: vk.kalichkin@gmail.com

Представлен анализ направлений научных исследований в области земледелия, связанных с преобладающей современной парадигмой. С опорой на теорию Т. Куна описано понятие «парадигма», которая, согласно представлениям ученого, формирует мировоззрение исследователей в определенной предметной области, является основой для выбора подходов и методов научных исследований в любой научной дисциплине. Показаны методологические основания изучения систем земледелия, подчеркнута зависимость агрономических исследований от логического позитивизма и инструментализма с редукционистским подходом. Обосновано применение системного мышления при разработке программ исследований в области земледелия, анализе и интерпретации результатов полевых экспериментов, в том числе с использованием искусственного интеллекта. Подчеркнута необходимость развития исследований по географии систем земледелия и их масштабированию в пространстве и во времени с помощью формирования архетипов на основе результатов полевых опытов научных и учебных учреждений, полученных на «небольших участках». С целью развития подходов к масштабированию архетипов систем земледелия предложено использовать концепцию «геонов» (геонов) как одного из перспективных направлений в геоинформатике, а также материалов дистанционного зондирования. Для преодоления негативного воздействия на природу химико-техногенной интенсификации одним из основных подходов может быть увеличение биоразнообразия, в частности диверсификация. Стратегии диверсификации систем земледелия реализуются за счет севооборотов, ассоциированных видов растений (покровные культуры, культуры-ловушки, культуры-репелленты, буферные культуры), смеси сортов и культур, агролесомелиорации и формирования неоднородности агроландшафтов. В рамках адаптации систем земледелия к возможному изменению климата целесообразно интегрировать знания, полученные из количественных климатических моделей и моделей архетипов систем земледелия, для использования их в цифровых системах управления земледелием «на местах». Следует направить усилия на развитие имитационного моделирования. Механистические модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур, разработанные для однородной единицы в определенной точке пространства, необходимо масштабировать для различных сценариев окружающей среды.

Ключевые слова: парадигма, системный подход, архетипы систем земледелия, агрогеография, масштабирование, диверсификация, адаптация, имитационное моделирование

On the need to transform the paradigm of scientific research in agriculture (*the first message*)

✉ Kalichkin V.K.

Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences
Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia

✉ e-mail: vk.kalichkin@gmail.com

Analysis of the directions of scientific research in the field of agriculture related to the prevailing modern paradigm is presented. Based on the theory of T. Kuhn, the concept of "paradigm" is

described, which, according to the scientist's ideas, forms the worldview of researchers in a certain subject area and serves as the basis for choosing approaches and methods of scientific research in any scientific discipline. The methodological foundations of the study of farming systems are shown, and the dependence of agronomic research on logical positivism and instrumentalism with a reductionist approach is emphasized. The application of systematic thinking in the development of research programs in the field of farming, analysis and interpretation of the results of field experiments, including the use of artificial intelligence is substantiated. The need to develop research on the geography of farming systems and their scaling in space and time through the formation of archetypes based on the results of field experiments of scientific and educational institutions obtained on "small plots" is emphasized. In order to develop approaches to scaling the archetypes of farming systems, it is proposed to use the concept of "geons" as one of the promising trends in geoinformatics, as well as remote sensing materials. Increasing biodiversity, in particular diversification, may be one of the main approaches to overcome the negative impacts of chemical-technogenic intensification on nature. Strategies for diversifying cropping systems are implemented through crop rotations, associated plant species (cover crops, trap crops, repellent crops, buffer crops), mixture of varieties and crops, agroforestry and formation of agro-landscape heterogeneity. As part of the adaptation of farming systems to potential climate change, it is useful to integrate knowledge from quantitative climate models and farming system archetype models for use in digital farming management systems "on the ground". Efforts should be directed towards the development of simulation modeling. Mechanistic models of crop production process developed for a homogeneous unit at a particular point in space need to be scaled for different environmental scenarios.

Keywords: paradigm, systemic approach, archetypes of farming systems, agrogeography, scaling, diversification, adaptation, simulation modeling

Для цитирования: Каличкин В.К. О необходимости трансформации парадигмы научных исследований в области земледелия (*сообщение первое*) // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. Т. 54. № 7. С. 117–129. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-7-12>

For citation: Kalichkin V.K. On the need to transform the paradigm of scientific research in agriculture (*the first message*). *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2024, vol. 54, no. 7, pp. 117–129. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-7-12>

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

В современной научной литературе по сельскому хозяйству понятие «парадигма» встречается в различных контекстах и семантических приложениях, например «парадигма сельскохозяйственного природопользования» [1], «биоэнергетические, экологические и социально-экономические парадигмы»¹, «почвосберегающая парадигма земледелия» [2], «парадигма агрогеографии» [3], «точное земледелие как новая парадигма растение-

водства»², «парадигма ландшафтопользования» [4] и др.

Понятие «парадигма» получило распространение после выхода в 1962 г. книги американского историка науки Т. Куна³. По Т. Куну, парадигма задает определенное видение мира и очерчивает круг проблем, которые в этой парадигме имеют смысл и решение. Т. Кун ввел также понятие дисциплинарной матрицы, которая включает элементы

¹Жученко А.А. Вызовы XXI столетия мировой и отечественной продовольственной безопасности // Агропродовольственная политика России. 2012. № 1. С. 6–9.

²Усков И.Б., Якушев В.П., Чесноков Ю.В. Управление агробиологическими системами – физико-агрономические и генетико-селекционные аспекты (к 85-летию Агрофизического научно-исследовательского института) // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 3. С. 429–436.

³Кун Т. Структура научных революций: пер. с англ. / сост. В.Ю. Кузнецов. М., 2003. 605 с.

трех видов: символические обобщения, или законы; модели и онтологические интерпретации; образцы решения проблем. Символические обобщения и их онтологические интерпретации задают мир, который исследует сторонник данной парадигмы. Онтологическая интерпретация определяет те сущности, к которым относятся законы теории. Образцы решения проблем – это, по сути, рекомендации, сформированные по результатам обобщения эмпирических исследований. Философский словарь трактует парадигму как «воплощенную в научной практике на данном этапе совокупность теоретических и методологических предпосылок, определяющих конкретное научное исследование»⁴.

Под парадигмой можно также понимать совокупность научных достижений в определенной предметной области, признаваемых всем научным сообществом в тот или иной период времени и служащих основой для новых научных исследований. Все, что не попадает в этот круг, будет выходить за пределы сферы научных интересов сторонников определенной парадигмы. Кроме того, парадигма устанавливает допустимые методы решения проблем в данной предметной области и поэтому фактически детерминирует тип фактов, получаемых в процессе эмпирического исследования. Таким образом, парадигма является также основой определенной научной традиции. Теория Т. Куна показывает, что почти каждый значительный прорыв в научном развитии – это прежде всего разрыв с традицией, со старыми способами мышления, со старыми парадигмами.

Современная парадигма земледелия включает в себя индустриальные агротехнологии, а также зеленую, агрохимическую, трансгенную и информатизационную «революции» [5]. Она реализуется через проектирование и освоение внутрихозяйственных адаптивно-ландшафтных систем земледелия.

Методологической базой изучения систем земледелия должно быть понимание того, что они характеризуются состояниями, да-

лекими от равновесия, коэволюцией компонентов системы, свойствами самоорганизации, нелинейной динамикой, многомерной структурой, высоким уровнем неопределенности, ограниченным контролем факторов и межмасштабными взаимосвязями во времени и в пространстве. Будучи сложной системой земледелие является выражением определенных взаимодействий человека и окружающей среды в динамичном процессе, формируемом неопределенностью, ошибками и адаптацией. Необходимость опираться на системный подход была сформулирована десятилетия назад⁵, однако в агрономической науке все еще сохраняется представление о возможностях человека всецело контролировать природу, что служит главной причиной уязвимости человеческого общества в результате проявления «антропоцентрического высокомерия» [6]. Добавим, что в системах земледелия неопределенность, возникающая в результате вмешательства человека, часто выше, чем неопределенность, обусловленная природой.

Можно сказать, что агрономическая наука, по аналогии с физикой, в большой степени зависит от логического позитивизма и инструментализма. В логическом позитивизме атомистическое или отраслевое мышление, основанное на редукционистском подходе, доминирует над целостным мышлением и предпочитает для поддержки научных утверждений экспериментальные подходы абстрактным законам и фундаментальным принципам⁶. Такой образ мышления также оказывается препятствием для преодоления ограничений анализа причинно-следственных связей. Ограничения еще более усугубляются узостью методологии, применяемой для обоснования научных утверждений. В этом, кстати, проявляется отставание агрономической науки от развития науки в целом, которая в настоящее время характеризуется как «постнеклассическая рациональность», суть которой заключается в изучении сложных самоорганизующихся систем⁷.

⁴Философский словарь / под ред. И.Т. Фролова. М.: Республика, 2001. 720 с.

⁵Образцов А.С. Системный метод: применение в земледелии. М.: Агропромиздат, 1990. 304 с.

⁶Архипьев Н.Л. Логический позитивизм и современная формальная философия науки // Манускрипт. 2017. № 12-2 (86). С. 22–26.

⁷Степин В.С. Особенности научного познания и критерии типов научной рациональности // Эпистемология и философия науки. 2013. Т. 36. № 2. С. 78–91.

В агрономии выводы о состоянии систем основаны на результатах проверки различных гипотез в контролируемых полевых испытаниях, направленных на определение эффективности отдельных приемов и элементов системы. Именно поэтому они благоприятствуют частным подходам к интерпретации данных. Упускаются из виду преимущества анализа процессов для объяснения состояния систем, игнорируются аналитические инструменты, предоставляемые методами, основанными на машинном обучении и искусственном интеллекте (в том числе объяснимом – Explainable artificial intelligence).

Большинство исследований в области земледелия по-прежнему сосредоточены на краткосрочной оптимизации и повышении эффективности отдельных блоков (элементов) системы, а не на ее способности формировать долгосрочную производственную и экономическую устойчивость (стабильность). Хотя термин «устойчивость» не имеет адекватного функционального определения, существует общее мнение, что цель достижения устойчивости состоит в том, чтобы развивать системы землепользования так, чтобы они полностью удовлетворяли потребности общества на неопределенный срок. Пространство устойчивости для любой подобного рода системы имеет n -ное число измерений, определяемых множеством границ, которые представляют собой пределы приемлемых для системы условий. Следовательно, устойчивость также можно определить как меру того, в какой степени изменения с течением времени перемещают компоненты системы внутри или за пределами нестатического пространства устойчивости.

В теории систем широко признано, что если каждый элемент системы, рассматриваемый по отдельности, заставить работать настолько эффективно, насколько это возможно, то система в целом *не* будет работать так эффективно, насколько это возможно⁸. Поэтому производительность системы больше зависит от того, как взаимодействуют ее части, чем от того, как они действуют независимо друг

от друга. Следовательно, для оптимизации функционирования систем важны все их составляющие, а не отдельные элементы.

Следует также отметить, что любой объект или система, независимо от своей природы, обладают бесконечным набором свойств и характеристик. Учет их всех делает решение задачи по описанию объекта или системы практически невозможным. «Научный метод» обходит эту проблему допущением, что многие свойства объекта не влияют или слабо влияют на рассматриваемую задачу и их можно не принимать во внимание («Не следует множить сущее без необходимости» – бритва Оккама). Поэтому классический «научный метод» никогда не рассматривает изучаемый объект напрямую, а всегда имеет дело с некоторым его упрощенным отражением в сознании человека (образом). Это упрощение иначе называется моделью, в которой и оговаривается тот набор свойств и характеристик системы, который будет учтен в дальнейшем.

Таким образом, существуют фундаментальные различия между аналитико-редукционистским подходом и системным мышлением. Системы земледелия характеризуются сложностью и изменчивостью. Сложность возникает из-за изначально непростых процессов в растениях, почве и приземном слое воздуха, объединенных в почти бесконечный набор комбинаций, связанных с биотическими и абиотическими факторами, которые по своей сути изменчивы как в пространстве, так и во времени. Поэтому системное мышление (системный анализ) не просто необходимо применять в качестве отдельной части исследовательской программы, его следует рассматривать как основу, отправную точку для целостного исследования и анализа решаемой проблемы. Целостный подход к системе земледелия предполагает изучение сложности взаимодействий в двух аспектах: внутри «жесткой» системы (биологические и технологические компоненты моделируются) и внутри «мягкой» системы (биологический и технологический компоненты имеют

⁸Акофф Р. Искусство решения проблем: пер. с англ. М., 1982. 224 с.

общий смысл и контекст). Акцентирование на понимании взаимосвязей и многочисленных причинах явления отличает системы земледелия от тех подходов в агрономии, которые сосредоточены на технологических решениях. Примером такого подхода служит так называемое точное земледелие, в рамках которого преимущественно решаются текущие проблемы управления продуктивностью посевов. По сути, в точном земледелии реализуются некоторые приемы агротехники возделывания сельскохозяйственных культур (в дискурсе точного земледелия – агротехнологии), но с применением возможностей современных информационных систем (ГЛОНАСС/GPS, ГИС, дистанционное зондирование, технология оценки урожайности, переменное нормирование, Интернет вещей). Однако агротехнологии сами по себе являются лишь заключительным этапом реализации систем земледелия и их связующим звеном [5]. По существу, система земледелия является возникающим свойством материальных условий, а также социального строительства, мотивации и поведения. Поэтому проектирование систем земледелия предполагает интеграцию нескольких пространственных и временных уровней, требующих сочетания обширного набора данных, имитационных моделей и экспертных знаний, в том числе «местных» знаний.

Источники знаний в земледелии, как указывалось выше, основываются на результатах индуктивного анализа экспериментов, проведенных на опытных полях научных и учебных учреждений в ограниченном географическом пространстве, а агрономические рекомендации носят общий характер и внедряются на больших территориях. Однако результаты, полученные в отдельной точке пространства (в экспериментах на «небольших участках»), не являются репрезентативными для неоднородных производственных полей, расположенных в различных природных условиях пусть даже одной почвенно-климатической провинции или агроэкологической группы земель. Неоднородность природных условий и социально-экономических статусов землепользований тре-

бует адаптированных к местным условиям решений и «наиболее адекватных» подходов. Прежде чем выдать рекомендации по применению управляющих воздействий, необходимо знать частоту и размерность отклика на различные вмешательства в жизненные циклы биологических объектов не только во времени, но и в пространстве («зона управления»). Поиск методов внутрипольного выделения «зон управления» при реализации технологий точного земледелия в последнее время активно развивается [7, 8].

К сожалению, относительно мало усилий в агрономической науке было потрачено на формулирование приемлемых гипотез и теорий, связанных с агрономическими эффектами реализации систем земледелия в различных пространственных (географических) условиях (группа земель, агроландшафтный район, почвенно-климатическая провинция). Следует заметить, что в отечественном научном дискурсе обсуждаются проблемы «агрогеографии». Однако основными предметами этого направления являются изучение особенностей территориальной организации сельского хозяйства и выявление закономерностей функционирования пространственных сельскохозяйственных систем, их взаимоотношения под влиянием внешних факторов для принятия управленческих решений, в основном организационно-экономического характера [9]. За рубежом развивается направление под названием «ландшафтная агрономия» [10]. Но эти исследования сосредоточены, как правило, на ограниченном пространственном объекте – агроландшафте (как и в трактовке предмета агрогеографии Д.А. Ивановым [3]). Предметом «биогеографии» является в основном классификация регионов с точки зрения их биоты, которая служит ключом к пониманию экологических и исторических факторов, влияющих на распространение видов, и того, как они реагируют на прошлые или текущие физические и биологические детерминанты [11].

С нашей точки зрения, необходимо развитие исследований по географии систем земледелия (GeoFarmSyst), главной целью которых было бы масштабирование архети-

пов (прототипов) систем земледелия, разработанных в отдельной точке географического пространства научными и учебными учреждениями, для реализации их на «местах» в контексте интеллектуального земледелия. Учитывая растущую доступность географических информационных систем (ГИС) и пространственных данных, необходимо более широко использовать цифровые карты и географическую привязку анализа данных. Такое использование возможностей геоинформационного моделирования нашло бы отражение в лучшем понимании влияния биотических и эдафических факторов среды на реакцию возделываемых культур и способствовало бы более адекватной интерпретации количественных результатов научных экспериментов.

Под архетипом системы земледелия понимается модель использования сельскохозяйственных земель определенной агроэкологической группы с экологически и экономически детерминированным набором возделываемых культур и соответствующими приемами управляющих воздействий (севооборот, обработка почвы, удобрения, защита растений) [12].

Масштабирование архетипов систем земледелия от «небольших участков» до регионального уровня или иной таксономической единицы предполагает увязку различных пространственных и временных масштабов и вызовет практические и теоретические проблемы. Во-первых, потребуются высокопроизводительные решения, интегрирующие передовые инструменты ГИС с дистанционным зондированием и машинным обучением, а также развитая вычислительная инфраструктура. Во-вторых, интеграция пространственно неоднородных данных о климате, рельефе, почве и управлении неизбежно приведет к ошибкам агрегирования, пространственным и временным искажениям в моделировании. Поэтому необходимо предварительно проверять различные подходы к классификации пространствен-

ных объектов. Например, стратификацию – подход, используемый в рамках пространственной классификации для выявления архетипических моделей агроэкологического потенциала земель на основе кластеризации переменных с помощью машинного обучения по биоклиматическим условиям, характеристикам почвы и топографическим параметрам [13], или выделение агроэкологических зон с учетом рельефа, почвенного покрова и агрометеорологических ресурсов с целью создания карт пригодности земель для возделывания тех или иных сельскохозяйственных культур [14].

Перспективным направлением исследований с целью разработки подходов к масштабированию архетипов систем земледелия, на наш взгляд, может быть применение концепции «geons» (геоны)⁹. Эта концепция применяется в геоинформатике в качестве стратегии представления и анализа скрытых пространственных процессов в разных географических масштабах (местных и региональных) для зонирования территории. Геоны – это географические единицы, однородные с точки зрения различных пространственных и временных явлений. Основная цель создания геонов – составление цифровых карт пространственных объектов с соответствующей базой геоданных, имеющих отношение к хозяйственному использованию. Модель геонов работает как двухэтапный процесс, где на первом шаге классификации используются экспертные знания, специфичные для конкретной предметной области, а второй шаг основан на полуавтоматическом зонировании посредством сегментации и классификации снимков дистанционного зондирования. Актуальность данного подхода обосновывается тем, что дает возможность применять алгоритмы машинного обучения для автоматизированной классификации образов, полученных с помощью дистанционного зондирования. Дистанционное зондирование, в свою очередь, рассматривается нами как наиболее перспективный инструмент для типизации

⁹Lang S., Kienberger S., Tiede D., Hagenlocher M., Pernkopf L. Geons – domain-specific regionalization of space // Cartography and Geographic Information Science. 2014. Vol. 41. N 3. P. 214–226.

земель и масштабирования архетипов систем земледелия.

С вопросами масштабирования систем земледелия тесно связаны проблемы их адаптации к природным и производственным условиям конкретного землепользования. Проблемы адаптации систем земледелия не новы и обсуждаются в различных контекстах [15, 16]. Однако хотелось бы обратить внимание, что эти проблемы обсуждаются в рамках так называемой «продуктивистской» модели сельского хозяйства (сознательное неограниченное увеличение производства и потребления сельскохозяйственной продукции), которая получила значительное развитие после Второй мировой войны. Эта модель основана на использовании «готовых» технологий (антропогенных ресурсов и генетики) в попытке преодолеть неоднородность окружающей среды с помощью достижений селекции культур и применения химических синтетических средств («зеленая революция» или химико-техногенная интенсификация). В рамках парадигмы «войны с голодом» сельское хозяйство рассматривалось как «машина», которую можно заставить работать лучше, отрегулировав «гайки и болты», т.е. удобрения, пестициды, семена, орошение, и обеспечить тем самым стабильный эффект в повышении продуктивности. В развитых странах эта модель способствовала специализации территорий на основе их пригодности для конкретных видов землепользования, что привело к стандартизации методов производства и, как следствие, к сокращению географических когнитивных ресурсов, необходимых для их внедрения¹⁰. С 80-х годов прошлого века появилось осознание негативного воздействия этой модели сельскохозяйственного производства на биоразнообразие, функционирование экосистем и изменение климата, а также на качество продукции, здоровье человека и на растущий дефицит ископаемых ресурсов и воды (см. сноску 1) [17].

В связи с этим ставится под сомнение доминирующая парадигма интенсификации зем-

леделия и ищутся новые пути построения устойчивых агроэкосистем. Преодолению негативного воздействия на природу «продуктивистской» модели может помочь концепция увеличения биоразнообразия, в частности диверсификация. Считается, что диверсифицированные системы земледелия по сравнению с единообразными системами активнее способствуют поддержанию следующих элементов: биоразнообразие, качество почвы, связывание углерода и влагоудерживающая способность почв, эффективность использования энергии, а также устойчивость к изменению климата [18, 19]. Существуют различные типы стратегий диверсификации систем земледелия: севооборот, ассоциированные виды растений (покровные культуры, культуры-ловушки, культуры-репелленты и буферные культуры), смеси сортов и культур, агролесомелиорация, формирование неоднородности ландшафта.

Однако метаанализ, опубликованный в [20], показал высокую вариативность подходов к диверсификации сельскохозяйственных культур и отсутствие единой теоретической концепции. Для лучшей сопоставимости и возможности обобщения результатов различных первичных исследований авторами предложена концептуальная основа, состоящая из следующих элементов (доработана нами): 1) характеристика базовой системы земледелия, подлежащая диверсификации; 2) определение масштаба и целевой территории землепользования; 3) разработка плана эксперимента и целевых переменных с учетом специализации землепользования; 4) определение (моделирование) ожидаемого эффекта от эксперимента. Применение этой основы будет способствовать определению пределов диверсификации и ее возможных преимуществ. Полная перестройка землепользования в сторону высокодиверсифицированных систем земледелия, скорее всего, окажется неосуществимой, но принятие отдельных элементов диверсификации может обеспечить реалистичный подход к повышению устойчивости земледелия.

¹⁰Duru M., Therond O., Fares M. Designing agroecological transitions: a review // *Agronomy for sustainable development*. 2015. Vol. 35. P. 1237–1257.

В настоящее время обсуждается также проблема реализации систем земледелия «без пестицидов, но с применением удобрений» [21]. Назовем их «промежуточными» между химико-техногенными (традиционными) и органическими системами. По сравнению с органическим земледелием технологии производства без пестицидов являются более гибкими и сопряжены с меньшими препятствиями для внедрения, а также с меньшими потерями урожая. Однако существуют различные барьеры для их реализации, поэтому требуется изучение всех положительных и отрицательных проявлений этих систем.

Важным аспектом адаптации систем земледелия считается также приспособление к возможным изменениям климата. Однако принятие решений о том, как и когда адаптироваться к изменению климата, является сложной задачей, включающей множество проблемных вопросов, глубокую неопределенность и спорные цели. Были разработаны многочисленные стратегии принятия решений для уменьшения неопределенности, проведена оценка вариантов адаптации в рамках множества будущих сценариев, созданы пути принятия решений по адаптации к изменению климата, однако все это не привело к преодолению барьеров, которые не позволяют принятым решениям по адаптации быть «рациональным» процессом [22].

Кроме того, различие между осуществимым, возможным, правдоподобным и вероятным сценариями изменения климата не всегда четкое [23]. Во многом это объясняется тем, что антропогенное изменение климата затрагивает системы, которые являются возникающими и быстро изменяющимися нелинейным образом, выходящими за пределы диапазонов, для которых существуют надежные научные знания. К тому же климатологии присуща ограниченная способность прогнозировать события с низкой вероятностью, она также не предлагает способов оценки эффектов конкретных решений и, следовательно, реакцию климатических систем на антропогенные вмешательства. В свою очередь, многие решения по адаптации зависят от контекста, что ограничивает способность

делать обобщения на основе климатических моделей в пространственном и временном масштабах [24]. Тем не менее для разработки методов (способов, приемов) адаптации систем земледелия к возможному изменению климата необходима интеграция знаний, полученных из количественных климатических моделей и моделей архетипов систем земледелия, для использования их в цифровых системах управления земледелием.

В целях развития цифровых систем управления земледелием в научных исследованиях необходимо уделить больше внимания имитационному моделированию. Модели необходимы для ответа на конкретный вопрос предметной области, создаются для этой цели и бывают разных форм. Статистические (или эмпирические) модели используют математическую связь между различными переменными. Принципиальным недостатком статистических моделей является то, что они разрабатываются на основе полученных данных и плохо подходят для использования в приложениях, которые не участвовали в параметризации и разработке модели. Они также не могут прогнозировать значения в неопределенном контексте (например, влияние изменения климата на рост сельскохозяйственных культур). Механистические модели (также называемые моделями, основанными на процессах, или биофизическими), напротив, основаны на моделировании биофизических процессов. Они используют математические уравнения, описывающие эти процессы, а не уравнения, просто связывающие две переменные, как в статистическом моделировании. Их можно вывести в отсутствие каких-либо реальных данных, если процесс описан. Механистические модели могут быть детерминированными, т.е. без случайных изменений внутри модели и уравнений, так что для данного набора входных данных результат всегда будет одним и тем же. Механистические модели также могут быть стохастическими, т.е. модели и уравнения включают случайные эффекты, поэтому результаты будут меняться, даже если входные данные остаются постоянными. Большинство моделей сельскохозяйственных культур представляют собой комбинацию процессных и

эмпирических моделей, в результате чего создаются механистические детерминированные модели¹¹.

Модели учитывают взаимосвязь между ростом сельскохозяйственных культур, агроэкологическими условиями и управляющими воздействиями. Поэтому они, по определению, являются системными, а целью в данном случае выступает моделирование взаимодействия между почвой, растениями и атмосферой. Для достижения этой цели используются междисциплинарные подходы, в которых учитываются биологические, физиологические, экологические, физические или экономические компоненты. Интеграция этих компонент привела к разработке таких известных моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений, как APSIM, DSSAT, STICS, WOFOST, CropSyst или AGROTOOL. Иногда их называют «моделями урожая», и трактуются они как пояснительные инструменты, которые обычно используются при тестировании различных подходов к управлению продуктивностью посевов.

Большинство биофизических моделей имеют ограничения, а именно они являются «точечными моделями». Они разработаны для моделирования роста и развития сельскохозяйственных культур для однородной единицы в определенной точке пространства. Кроме того, биофизические модели требуют большого количества входных данных. Например, для программы WOFOST нужны данные примерно по 40 входным параметрам, для AGROTOOL – по более чем 190. Механистические модели не способны моделировать потерю урожая из-за развития сорняков, вредителей и болезней, а также ущерб, вызванный экстремальными погодными явлениями, такими как град или сильный ветер. Приложения таких моделей лучше всего подходят для полевых экспериментов, прогнозирования и анализа поведения сельскохозяйственных культур в различных сценариях окружающей среды.

Механистические модели целесообразно также использовать в комплексе с имита-

ционным моделированием. Имитация – это описательный инструмент, который применяется: 1) для описания существующей в настоящее время системы; 2) исследования гипотетической системы; 3) доработки и расширения существующей системы. Роль имитационной модели заключается в создании «виртуального мира», в котором могут проводиться эксперименты для облегчения изучения соответствующей системы. Имитационное моделирование целесообразно применять при решении задач планирования урожайности сельскохозяйственных культур и управляющих воздействий в камеральных условиях. По результатам имитационного моделирования разрабатывается соответствующая программа полевых исследований.

Следует заметить, что применение механистических моделей в пространственном масштабе в неоднородной реальной ситуации ограничено. В этом контексте методы дистанционного зондирования могут дополнить механистические модели, в частности, генерируя недостающую пространственную информацию для единицы моделирования. Хотя эти две технологии развивались независимо, в настоящее время они могут использоваться синергетически в различных пространственных и временных масштабах для общего развития цифрового управления системами земледелия и их реализации «на местах».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Парадигма формирует мировоззрение исследователей в определенной предметной области и является основой для выбора подходов и методов исследовательского процесса в любой научной дисциплине.

Методологические основания изучения систем земледелия заключаются в их сложности, изменчивости и неопределенности (точнее – недоопределенности). Поэтому когнитивные проблемы земледелия не могут быть решены с использованием философии логического позитивизма и инструментализ-

¹¹Antle J.M., Jones J.W., Rosenzweig C.E. Next generation agricultural system data, models and knowledge products: Introduction // *Agricultural systems*. 2017. Vol. 155. P. 186–190.

ма с редукционистским подходом. Необходимо применение системного мышления при разработке программ исследований, анализе и интерпретации результатов полевых экспериментов, в том числе с использованием искусственного интеллекта.

Для трансформации современной парадигмы земледелия с целью ее актуализации целесообразно обратить внимание на решение следующих вопросов:

– исследования по географии систем земледелия и их масштабирование в пространстве и во времени необходимо проводить на основе выделения архетипов и с учетом результатов полевых опытов научных и учебных учреждений, полученных на «небольших участках»;

– с целью развития подходов к масштабированию архетипов систем земледелия необходимо использовать достижения современной геоинформатики, интегрированных с данными дистанционного зондирования;

– для преодоления негативного воздействия на природу химико-техногенной интенсификации («продукционной» модели) нужно исследовать пределы диверсификации систем земледелия, которая может быть реализована через севообороты, ассоциированные виды растений, смеси сортов и культур и др.;

– с целью разработки сценариев адаптации систем земледелия к возможному изменению климата целесообразно интегрировать знания, полученные из количественных климатических моделей и моделей архетипов систем земледелия, для использования их в цифровых системах управления земледелием «на местах»;

– механистические модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур, разработанные для однородной единицы в определенной точке пространства, необходимо масштабировать для различных сценариев окружающей среды и пространственных объектов, а также использовать их в интеграции с имитационным моделированием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирюшин В.И. Развитие парадигмы сельскохозяйственного природопользования

(к 175-летию В.В. Докучаева) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2021. Спец. выпуск. С. 5–26. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-D-5-26.

2. Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю. Земледелие – прошлое, настоящее, будущее // Биосфера. 2019. Т. 11. № 3. С. 109–119. DOI: 10.24855/biosfera.v11i3.507.
3. Иванов Д.А. Теоретические аспекты агрогеографии // Вестник Российской академии наук. 2018. Т. 88. № 9. С. 804–810. DOI: 10.31857/S086958730001693-0.
4. Старожилов В.Т. Новая концепция ландшафтной адаптации земледелия геосистем нооландшафтосферы // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 83-2. С. 117–122. DOI: 10.18411/trnio-03-2022-75.
5. Кирюшин В.И. Система научно-инновационного обеспечения технологий адаптивно-ландшафтного земледелия // Земледелие. 2022. № 2. С. 3–7. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-2-3-7.
6. Washington H., Piccolo J., Gomez-Baggethun E., Kopnina H., Alberro H. The trouble with anthropocentric hubris, with examples from conservation // Conservation. 2021. Vol. 1. N 4. P. 285–298. DOI: 10.3390/conservation1040022.
7. Якушев В.П., Петрушин А.Ф., Матвеевко Д.А., Блохина С.Ю., Канаиш Е.В., Якушев В.В. Новый метод количественной оценки внутриполевой изменчивости по оптическим характеристикам посевов для точного земледелия // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2020. № 2. С. 4–10. DOI: 10.30850/vrsn/2020/2/4-10.
8. Reyes F., Casa R., Tolomio M., Dalponte M., Mzid N. Soil properties zoning of agricultural fields based on a climate-driven spatial clustering of remote sensing time series data // European Journal of Agronomy. 2023. Vol. 150. P. 126930. DOI: 10.1016/j.eja.2023.126930.
9. Носонов А.М. Современные методы моделирования развития сельского хозяйства // Географическая среда и живые системы. 2018. № 3. С. 62–74. DOI: 10.18384/2310-7189-2018-3-62-74.
10. Rizzo D., Debolini M., Thenail C., Lardon S., Marraccini E. Agriculture at the landscape level: scientific background and literature overview // Landscape Agronomy. Springer; Cham, 2022. P. 1–23. DOI: 10.1007/978-3-031-05263-7_1.

11. *Morrone J.J.* The spectre of biogeographical regionalization // *Journal of Biogeography*. 2018. Vol. 45. N 2. P. 282–288. DOI: 10.1111/jbi.13135.
12. *Каличкин В.К., Максимович К.Ю.* Методология формирования цифровой системы управления земледелием // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2024. Т. 54. № 3. С. 5–20. DOI: 10.26898/0370-8799-2024-3-1.
13. *Beckmann M., Didenko G., Bullock J.M., Cord A.F., Paulus A., Ziv G., Václavík T.* Archetypes of agri-environmental potential: a multi-scale typology for spatial stratification and up-scaling in Europe // *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17. N 11. P. 115008. DOI: 10.1088/1748-9326/ac9cf5.
14. *Amin M.E.S., Mohamed E.S., Belal A.A., Jalhoum M.E.M., Abdellatif M.A., Nady D., Ali A.M., Mahmoud A.G.* Developing spatial model to assess agro-ecological zones for sustainable agriculture development in MENA region: Case study Northern Western Coast, Egypt // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2022. Vol. 25. N 1. P. 301–311. DOI: 10.1016/j.ejrs.2022.01.014.
15. *Кирюшин В.И.* Состояние и проблемы развития адаптивно-ландшафтного земледелия // *Земледелие*. 2021. № 2. С. 3–7. DOI: 10.24411/0044-3913-2021-10201.
16. *Савин И.Ю.* Пространственная адаптация систем земледелия к пестроте полей // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*. 2021. Т. 16. № 4. С. 362–369. DOI: 10.22363/2312-797X-2021-16-4-362-369.
17. *Brooker R.W., Hawes C., Iannetta P.P.M., Karley A.J., Renard D.* Plant diversity and Ecological Intensification in crop production systems // *Journal of Plant Ecology*. 2023. Vol. 16. N 6. P. rtad015. DOI: 10.1093/jpe/rtad015.
18. *Tamburini G., Bommarco R., Wanger T.C., Kremen C., van der Heijden M.G.A., Liebman M., Hallin S.* Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield // *Science advances*. 2020. Vol. 6. N 45. P. 1715. DOI: 10.1126/sciadv.aba1715.
19. *Hufnagel J., Reckling M., Ewert F.* Diverse approaches to crop diversification in agricultural research: a review // *Agronomy for Sustainable Development*. 2020. Vol. 40. P. 1–17. DOI: 10.1007/s13593-020-00617-4.
20. *Beillouin D., Ben-Ari T., Makowski D.* A dataset of meta-analyses on crop diversification at the global scale // *Data in Brief*. 2019. Vol. 24. P. 103898. DOI: 10.1016/j.dib.2019.103898.
21. *Finger R., Möhring N.* The emergence of pesticide-free crop production systems in Europe // *Nature Plants*. 2024. Vol. 10. P. 360–366. DOI: 10.1038/s41477-024-01650-x.
22. *Siders A.R., Pierce A.L.* Deciding how to make climate change adaptation decisions // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2021. Vol. 52. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.cosust.2021.03.017.
23. *Jewell J., Cherp A.* The feasibility of climate action: Bridging the inside and the outside view through feasibility spaces // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2023. Vol. 14. N 5. P. e838. DOI: 10.1002/wcc.838.
24. *Stern P.C., Wolske K.S., Dietz T.* Design principles for climate change decisions // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2021. Vol. 52. P. 9–18. DOI: 10.1016/j.cosust.2021.05.002.

REFERENCES

1. Kiryushin V.I. Developing the paradigm of environmental management in agriculture (to the 175th anniversary of V.V. Dokuchaev). *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva = Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Special Issue, pp. 5–26. (In Russian). DOI: 10.19047/0136-1694-2021-D-5-26.
2. Aparin B.F., Sukhacheva E.Yu. Husbandry: its past, present and future. *Biosfera = Biosfera*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 109–119. (In Russian). DOI: 10.24855/biosfera.v11i3.507.
3. Ivanov D.A. Theoretical aspects of agrogeography. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 88, no. 9, pp. 804–810. (In Russian). DOI: 10.31857/S086958730001693-0.
4. Starozhilov V.T. A new concept of landscape adaptation of agriculture of geosystems of the landscape sphere. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the development of science and education*, 2022, no. 83-2, pp. 117–122. (In Russian). DOI: 10.18411/trnio-03-2022-75.
5. Kiryushin V.I. System of scientific and innovative support of adaptive landscape farming technologies. *Zemledelie = Zemledelie*, 2022, no. 2, pp. 3–7. (In Russian). DOI: 10.24412/0044-3913-2022-2-3-7.

6. Washington H., Piccolo J., Gomez-Baggethun E., Kopnina H., Alberro H. The trouble with anthropocentric hubris, with examples from conservation. *Conservation*, 2021, vol. 1, no. 4, pp. 285–298. DOI: 10.3390/conservation1040022.
7. Yakushev V.P., Petrushin A.F., Matvienko D.A., Blokhina S.Yu., Kanash E.V., Yakushev V.V. New method of quantity estimation of intra field variability by optical characteristics of sowings for precision farming. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki = Vestnik of the Russian agricultural science*, 2020, no. 2, pp. 4–10. (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2020/2/4-10.
8. Reyes F., Casa R., Tolomio M., Dalponte M., Mzid N. Soil properties zoning of agricultural fields based on a climate-driven spatial clustering of remote sensing time series data. *European Journal of Agronomy*, 2023, vol. 150, p. 126930. DOI: 10.1016/j.eja.2023.126930.
9. Nosonov A.M. Modern methods for spatial modeling of the development of agriculture. *Geograficheskaya sreda i zhivyye sistemy = Geographical Environment and Living Systems*, 2018, no. 3, pp. 62–74. (In Russian). DOI: 10.18384/2310-7189-2018-3-62-74.
10. Rizzo D., Debolini M., Thenail C., Lardon S., Marraccini E. Agriculture at the landscape level: scientific background and literature overview. *Landscape Agronomy*. Springer; Cham, 2022, pp. 1–23. DOI: 10.1007/978-3-031-05263-7_1.
11. Morrone J.J. The spectre of biogeographical regionalization. *Journal of Bio-geography*, 2018, vol. 45, no. 2, pp. 282–288. DOI: 10.1111/jbi.13135.
12. Kalichkin V.K., Maksimovich K.Yu. Methodology for forming a digital farming management system. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2024, vol. 54, no. 3, pp. 5–20. (In Russian). DOI: 10.26898/0370-8799-2024-3-1.
13. Beckmann M., Didenko G., Bullock J.M., Cord A.F., Paulus A., Ziv G., Václavík T. Archetypes of agri-environmental potential: a multi-scale typology for spatial stratification and upscaling in Europe. *Environmental Research Letters*, 2022, vol. 17, no. 11, p. 115008. DOI: 10.1088/1748-9326/ac9cf5.
14. Amin M.E.S., Mohamed E.S., Belal A.A., Jalhoum M.E.M., Abdellatif M.A., Nady D., Ali A.M., Mahmoud A.G. Developing spatial model to assess agro-ecological zones for sustainable agriculture development in MENA region: Case study Northern Western Coast, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 301–311. DOI: 10.1016/j.ejrs.2022.01.014.
15. Kiryushin V.I. State and problems of development of adaptive landscape agriculture. *Zemledelie = Zemledelie*, 2021, no. 2, pp. 3–7. (In Russian). DOI: 10.24411/0044-3913-2021-10201.
16. Savin I.Yu. Spatial adaptation of farming systems to the heterogeneity of plots. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo = RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 362–369. (In Russian). DOI: 10.22363/2312-797X-2021-16-4-362-369.
17. Brooker R.W., Hawes C., Iannetta P.P.M., Karley A.J., Renard D. Plant diversity and Ecological Intensification in crop production systems. *Journal of Plant Ecology*, 2023, vol. 16, no. 6, p. rtad015. DOI: 10.1093/jpe/rtad015.
18. Tamburini G., Bommarco R., Wanger T.C., Kremen C., van der Heijden M.G.A., Liebman M., Hallin S. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science advances*, 2020, vol. 6, no. 45, p. 1715. DOI: 10.1126/sciadv.ab1715.
19. Hufnagel J., Reckling M., Ewert F. Diverse approaches to crop diversification in agricultural research: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2020, vol. 40, pp. 1–17. DOI: 10.1007/s13593-020-00617-4.
20. Beillouin D., Ben-Ari T., Makowski D. A dataset of meta-analyses on crop diversification at the global scale. *Data in Brief*, 2019, vol. 24, p. 103898. DOI: 10.1016/j.dib.2019.103898.
21. Finger R., Möhring N. The emergence of pesticide-free crop production systems in Europe. *Nature Plants*, 2024, vol. 10, pp. 360–366. DOI: 10.1038/s41477-024-01650-x.
22. Siders A.R., Pierce A.L. Deciding how to make climate change adaptation decisions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, vol. 52, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.cosust.2021.03.017.
23. Jewell J., Cherp A. The feasibility of climate action: Bridging the inside and the outside view through feasibility spaces. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2023, vol. 14, no. 5, p. e838. DOI: 10.1002/wcc.838.
24. Stern P.C., Wolske K.S., Dietz T. Design principles for climate change decisions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, vol. 52, pp. 9–18. DOI: 10.1016/j.cosust.2021.05.002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

✉ **Каличкин В.К.**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник; **адрес для переписки:** Россия, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, а/я 463; e-mail: vk.kalichkin@gmail.com

AUTHOR INFORMATION

✉ **Vladimir K. Kalichkin**, Doctor of Science in Agriculture, Professor, Head Researcher; **address:** PO Box 463, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia; e-mail: vk.kalichkin@gmail.com

Дата поступления статьи / Received by the editors 18.04.2024

Дата принятия к публикации / Accepted for publication 29.05.2024

Дата публикации / Published 21.08.2024