

ВОДА И ЦИФРОВОЕ СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО:

современные технологии и мировой опыт



НИЦ МКВК
Научно-информационный центр
Межгосударственной координационной
водохозяйственной комиссии
Центральной Азии

Научно-информационный центр
Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии
Центральной Азии

**Вода и цифровое
сельское хозяйство:
современные технологии
и мировой опыт**

Ташкент 2026

Подготовлено и издано при финансовой поддержке проекта «Региональные механизмы для низкоуглеродной и климатоустойчивой трансформации взаимосвязи энергии, воды и земли в Центральной Азии», реализуемого ОЭСР, НИЦ МКВК и ЕЭК ООН за счет средств Федерального министерства окружающей среды, борьбы с изменением климата, охраны природы и ядерной безопасности (BMUKN) в рамках Международной климатической инициативы (IKI)

Содержание

Управление орошением и водопользованием	5
Применение подхода «чековой книжки» для оптимизации решений по орошению на основе почвенной влаги	5
Диверсификация сельскохозяйственных культур как стратегия эффективного водопользования	12
Экспертный центр по интеллектуальным дождевальным машинам создан в Бразилии для масштабирования технологий по всему миру	14
Систему умного полива на случай внезапной засухи разрабатывают ученые для интенсивных яблоневых садов.....	16
Почвы, их восстановление и борьба с деградацией	20
Китай разработал технологию превращения пустынного песка в плодородную почву за 10 месяцев.....	20
В Воронеже создали гидрогель для регулирования влажности почвы.....	25
С новым недорогим способом можно протестировать аграрную почву всего мира на содержание пластика	27
Ученые нашли способ улучшить почву с помощью гидроугля.....	29
Как псевдомонады помогут спасти засоленные почвы мира и вернуть их в сельскохозяйственный оборот	31
Почвенные бактерии могут спасти урожай от растущего кризиса засоления почв.....	34
Точное земледелие, цифровые технологии и искусственный интеллект	39
Каждый сантиметр на счету.....	39
Безупречная точность	45
Ученые призывают учитывать в разработке сельскохозяйственных приложений с ИИ особенности стран, где эти технологии будут применяться	52
Автономный сельхозробот находит сорняки и камни	56

Каждому аграрному региону нужен персональный, а не универсальный ИИ	58
Компания «Global Aerospace» сравнила применение дронов и пилотируемой авиации для управления сельскохозяйственными культурами	62
Климатическая устойчивость сельского хозяйства	70
Корни риса в центре внимания глобальных исследований климатической устойчивости	70
Защита сельскохозяйственных культур больше не успевает за природой: как сократить этот разрыв?	73
Архетипы могут ускорить адаптацию сельского хозяйства к сокращению снежного покрова	77
Производство сельскохозяйственных культур и продовольственная безопасность	90
Несмотря на изменение климата, мировое производство риса за 50 лет почти удвоилось	90
Рис кормит миллиарды людей, но его роль в изменении климата становится всё более значительной.....	91

Управление орошением и водопользованием

Применение подхода «чековой книжки» для оптимизации решений по орошению на основе почвенной влаги¹

Ронда Брукс

Эксперты в области орошения подчеркивают, что мониторинг суточного баланса «поступлений и расходов» почвенной влаги позволяет минимизировать ошибки при управлении поливом и поддерживать стабильную урожайность в критические фазы вегетации сельскохозяйственных культур.

В условиях роста затрат на оросительные ресурсы и увеличения климатической изменчивости аграрные производители вынуждены повышать эффективность использования водных ресурсов. Один из наиболее доступных и практичных подходов в текущем сезоне не требует внедрения дополнительного оборудования на дождевальными системами, а основан на более точной интерпретации динамики почвенной влажности.

Доцент Университета штата Северная Дакота, инженер-ирригатор Дин Стил указывает, что управление почвенной влагой целесообразно рассматривать по аналогии с банковским счетом, в рамках которого фиксируются водные «поступления» и «расходы». Такой подход, по его оценке, позволяет обосновывать сроки орошения и повышать его водоэффективность.

Он отмечает, что к «поступлениям» относятся атмосферные осадки и оросительная вода, тогда как к «расходам» — транспирационное водопотребление растений, а также процессы глубинной инфильтрации и поверхностного стока.

В начале вегетационного периода почвенный профиль характеризуется определенным уровнем влагосодержания и водного баланса. В течение суток основным фактором потерь влаги выступает эвапотранспирация, включающая испарение с поверхности почвы и транспирацию растений, тогда как восполнение влаги обеспечивается осадками и ирригационными мероприятиями.

¹ Источник: Rhonda Brooks. Treat Soil Moisture Like A Checkbook To Sharpen Irrigation Decisions / <https://www.agweb.com/news/crops/crop-production/treat-soil-moisture-checkbook-sharpen-irrigation-decisions> Опубликовано 14.04.2026

Дополнительно подчеркивается, что, аналогично финансовому учету, для эффективного управления водным режимом недостаточно фиксировать только объемы поступлений и потерь в годовом разрезе. Критически важным является учет временной динамики водного баланса, особенно в физиологически значимые периоды развития растений, такие как формирование генеративных органов растений (например, появление метелки у зерновых культур) и стадия налива зерна.

Почему сезонные суммарные показатели могут вводить в заблуждение

Стил использует распространённый в учебной практике «каверзный» вопрос, чтобы продемонстрировать, почему корректное определение сроков орошения имеет ключевое значение для управления водным режимом сельскохозяйственных культур.

Он задаёт студентам вопрос о том, каков объём оросительной воды потребуется, если культура имеет сезонную потребность в эвапотранспирации (ЕТ) в размере 18 дюймов (45,72 см), а количество выпавших осадков составляет 12 дюймов (30,48 см).

Стил объясняет, что даже в случае, если весь объём осадков (12 дюймов) выпадает 1 мая, а в течение остального вегетационного периода осадки отсутствуют, культура всё равно будет нуждаться в дополнительных 18 дюймах воды.

В такой ситуации осадки в начале вегетационного периода могут временно восполнить влагозапасы почвенного профиля, однако при отсутствии последующего пополнения влаги по мере водопотребления культуры в июле и августе происходит постепенное истощение почвенных влагозапасов. В результате водный «счёт» почвы оказывается дефицитным именно в период максимальной чувствительности растений к водному стрессу.

Из этого Стил делает вывод, что сезонные суммарные показатели скрывают гидрологические и агрономические риски. Он подчёркивает необходимость мониторинга динамического (накопительного) водного баланса почвы в течение сезона, а не только анализа суммарных значений осадков и орошения в годовом разрезе.

Составление упрощённой ведомости водного баланса

Стил отмечает, что фермеры могут применять практический подход к формированию водного баланса, используя уже доступные инструменты, включая дождемер, базовые данные по эвапотранспирации (ЕТ), а также учетные записи по орошению, которые, как правило, фиксируются в электронных таблицах хозяйств.

По его словам, базовый водный баланс, оформленный по аналогии с бухгалтерской книгой, должен включать четыре основных компонента:

1. Начальный водный запас: оценивается количество влаги, доступной в зоне корневой системы на момент посева, включая влагу, накопленную в результате предварительного орошения или весеннего пополнения почвенного профиля.

2. Суточное списание (водопотребление): учитываются оценки эвапотранспирации, получаемые из данных местных метеорологических сетей, агрометеорологических сервисов, прикладных расширительных инструментов (Extension tools) или расчетных моделей ЕТ. Эти значения используются для определения суточного расхода почвенной влаги сельскохозяйственными культурами.

3. Суточные поступления влаги: добавляется количество фактических атмосферных осадков (с учетом эффективных осадков, за вычетом поверхностного стока и иных потерь); добавляется объем оросительной воды, выраженный в дюймах за один поливной проход или за один цикл орошения.

4. Текущий водный баланс: осуществляется мониторинг остаточного количества влаги в эффективной зоне корнеобитания с сопоставлением с уровнем полевой влагоёмкости и установленным порогом допустимого истощения почвенной влаги.

Стил проводит аналогию между потерями влаги вследствие эвапотранспирации и сопутствующими водными потерями с неизбежными регулярными расходами в финансовой системе («продукты, жильё и налоги»), которые должны ежедневно компенсироваться поступлениями на «водный счёт». Он подчёркивает, что при устойчивом превышении расходов над поступлениями сельскохозяйственные культуры неизбежно переходят в состояние водного стресса задолго до проявления видимых календарных индикаторов.

Адаптация метода к различным климатическим условиям

Независимо от того, осуществляется ли сельскохозяйственное производство в северной части Среднего Запада или на территории Высоких

равнин, применяются единые принципы водного учета, аналогичные бухгалтерскому подходу. При этом фактические параметры водного баланса существенно варьируют в зависимости от климатической зоны.

Стил указывает, что в условиях штата Северная Дакота суммарная сезонная эвапотранспирация относительно невелика, а летние атмосферные осадки периодически способны компенсировать дефицит влаги, создавая условия для временного снижения интенсивности или приостановки оросительных мероприятий в периоды выпадения ливневых дождей.

В то же время, по словам Брайана Арналла, специалиста по распространению знаний в области точного управления питательными веществами из Университета штата Оклахома, в центральной и южной частях региона Высоких равнин водопотребление сельскохозяйственных культур существенно выше.

Он отмечает, что максимальные значения потенциального испарения (эвапотранспирации) могут достигать порядка 1,9 см/сутки, при типичных значениях около 1,3 см/сутки.

При сочетании высоких температур (около 36 °С), низкой относительной влажности воздуха (около 30 %) и интенсивного роста кукурузы происходит быстрое истощение запасов почвенной влаги в условиях Высоких равнин. В связи с этим Арналл указывает, что в таких ирригационных системах, как круговые дождевальные установки оборудование после запуска, как правило, функционирует практически непрерывно.

Он также отмечает, что к завершению сельскохозяйственного сезона суммарный водный баланс системы может приближаться к нулевым значениям или даже становиться отрицательным, если сопоставлять совокупную эвапотранспирацию с объемом доступных водных ресурсов.

Для фермерских хозяйств данного региона модель водного учета по принципу «чековой книжки» подтверждает необходимость практически непрерывного орошения для поддержания оптимального водного статуса культур и позволяет выявлять периоды, когда даже кратковременное прекращение полива может приводить к развитию водного стресса у растений.

Подбор системы орошения с учетом глубины корнеобитаемого слоя и типа почвы

Стил подчеркивает, что емкость условного «водного баланса» (аналог банковского счета влаги) зависит не только от величины водопоступлений и водопотерь, но также от глубины проникновения корневой системы сельскохозяйственных культур и гидрофизических свойств почвы. Он

отмечает, что кукуруза, характеризующаяся глубокой корневой системой и возделываемая на почвах с более высокой влагоемкостью (в частности, на тяжелых суглинистых и глинистых почвах), способна использовать более значительный объем почвенной влаги из расширенного корнеобитаемого слоя. В то же время картофель, обладающий относительно поверхностной корневой системой и произрастающий на легких песчаных почвах с низкой водоудерживающей способностью, имеет существенно ограниченный доступ к почвенным влагозапасам.

Для кукурузы суточное водопотребление на уровне порядка 1,7 см не является критическим при наличии достаточного влагозапаса в почвенном профиле. Напротив, на картофельных полях, где эффективная глубина корнеобитаемого слоя составляет примерно 12–18 дюймов ($\approx 30\text{--}45$ см), доступный объем почвенной влаги ограничен, что требует более частого проведения оросительных мероприятий.

Для сельскохозяйственных производителей это означает следующее:

- В условиях глубоких почвенных профилей с высокой водоудерживающей способностью формируется более значительный начальный запас продуктивной влаги, что позволяет системе выдерживать более высокий уровень суточного водопотребления между поливами без развития водного стресса.
- В условиях мелких или легких песчаных почв с низкой влагоемкостью почвенный запас влаги ограничен, вследствие чего даже умеренные значения суточной эвапотранспирации могут приводить к быстрому истощению водных ресурсов, если не увеличивается частота и точность оросительных циклов.

Использование регистрационных систем для управления сроками орошения

После внедрения учета водного баланса почвы процесс принятия решений в области орошения становится более формализованным и системно организованным. Стил рекомендует сельскохозяйственным производителям придерживаться следующих принципов управления оросительным режимом:

1. Осуществлять орошение при приближении прогнозируемого водного баланса к установленному порогу допустимого истощения почвенной влаги, а не ориентироваться исключительно на визуальные признаки поверхностного высыхания почвы.

2. Формировать норму полива таким образом, чтобы объем внесенной оросительной воды соответствовал прогнозируемому водопотреблению культуры на ближайшие несколько суток, с учетом ожидаемой эвапотранспирации и вероятности выпадения атмосферных осадков.

3. Заблаговременно учитывать пространственно-временные особенности движения оросительных установок, включая длинные проходы и круговые траектории, при которых продолжительность цикла может приводить к временному дефициту влаги в удаленных участках поля до повторного прохождения системы.

Стил обращает внимание, что при эксплуатации сложных оросительных систем, включая круговые дождевальные установки, он рассматривает необходимость мониторинга водного баланса как в начальной, так и в конечной точках зоны полива.

Он поясняет, что в таких системах важно отслеживать динамику водного состояния почвы по всей траектории движения установки, чтобы обеспечить своевременное возвращение системы в исходную зону при сохранении оптимального водного режима.

В практическом плане это может выражаться в увеличении нормы полива на отдельных участках траектории, регулировании скорости движения оросительной установки в критические фазы развития культур, а также в стратегическом допущении временных отклонений в зонах с относительно низким риском водного стресса, при условии сохранения стабильного расчетного водного баланса почвы.

Интеграция датчиков и инструментов оценки эвапотранспирации в систему водного учета («чековую книжку»)

Стил отмечает, что предложенная им аналогия водного баланса почвы с «чековой книжкой» может быть реализована не только посредством простых полевых записей, но и служит концептуальной основой для интеграции современных цифровых и сенсорных технологий.

Он указывает, что датчики измерения влажности почвы могут выполнять функцию «банковских выписок», обеспечивая верификацию того, что модельные оценки водного баланса соответствуют фактическому состоянию почвенного профиля. В свою очередь, модели эвапотранспирации (ЕТ), а также технологии дистанционного зондирования, позволяют повысить точность расчета суточных «расходов» воды, особенно по мере развития инструментов, основанных на данных спутникового наблюдения и радиолокационного мониторинга.

Стил приводит мнение о том, что в современных системах точного земледелия используются спутниковые данные в составе комплексных систем управления орошением. В таких системах осуществляется мониторинг метеорологических условий и состояния почвенного покрова, оценка водопотребления сельскохозяйственных культур и прогнозирование сроков наступления водного дефицита с последующей автоматизированной активацией оросительных систем.

Кроме того, отмечается, что производители и дистрибьюторы ирригационного оборудования предлагают специализированные программные приложения и цифровые инструменты для управления водным режимом на уровне поля, включая технологии дифференцированного (переменно-нормируемого) орошения. Такие решения, как правило, интегрированы в мобильные и настольные платформы, связанные с системами управления ирригационным оборудованием.

Стил полагает, что все перечисленные технологические инструменты направлены на решение фундаментального вопроса агромелиорации: каков текущий водный баланс почвы и каким он будет при проведении либо отсутствии оросительного воздействия в заданный временной интервал.

Управление водными ресурсами по аналогии с финансовыми механизмами

Стил подчеркивает, что, помимо математических расчетов и модельных подходов, ключевая идея заключается в том, что фермеры, рассматривающие почвенную влагу как ограниченный и управляемый ресурс, аналогичный финансовым средствам, способны более эффективно применять орошение в периоды, когда оно обеспечивает максимальную агрономическую отдачу.

Он отмечает, что систематический учет водных «поступлений» и «расходов», а также понимание того, что временной фактор («когда») имеет не меньшее значение, чем количественный («сколько»), позволяет существенно повысить эффективность управления водным режимом сельскохозяйственных культур. При этом учитывается влияние почвенных характеристик и климатических условий на формирование доступного водного запаса в корнеобитаемом слое (так называемого «размера водного счета»).

По его мнению, применение данного подхода позволяет сельскохозяйственным производителям уже в начале вегетационного сезона формировать более точное представление о динамике водного баланса, траектории расходования влаги и эффективности ее использования, а также оце-

нивать, в какой степени каждый объем подаваемой воды действительно способствует поддержанию продуктивности и снижению водного стресса культур.

Диверсификация сельскохозяйственных культур как стратегия эффективного водопользования²

Рената Римшайте

В орошаемом земледелии при обсуждении рисков внимание часто сосредоточивается на погодных условиях, доступности и эффективности использования водных ресурсов. Однако производственные риски редко рассматриваются изолированно. Неопределённость в сфере водоснабжения сельского хозяйства, как правило, связана с множеством факторов, включая изменения в законодательстве, рост затрат на энергию и нестабильность рынков. В связи с этим в дискуссиях о водных рисках всё большее внимание уделяется диверсификации сельскохозяйственных культур как потенциальной экономической стратегии в системе водопользования. Такой подход может способствовать выработке более устойчивых решений для управления связанными рисками.

Сельскохозяйственные предприятия, ориентированные на выращивание одной или ограниченного числа культур, как правило, демонстрируют высокую эффективность в стабильных условиях, однако становятся уязвимыми при их изменении. Например, наличие одной доминирующей культуры часто определяет пиковую потребность в орошении, структуру энергопотребления и график привлечения рабочей силы. Однако при сокращении водных ресурсов или нарушении сроков посева отсутствие альтернативных культур может усугубить негативные последствия. Различные сельскохозяйственные культуры отличаются глубиной корневой системы, сезонной потребностью в воде и устойчивостью к дефициту влаги. Например, рапс, который становится всё более популярной альтернативной культурой в Канзасе, требует меньше воды по сравнению с более традиционной культурой — кукурузой. Диверсифицированные системы земледелия позволяют снизить суммарную потребность в орошении или более равномерно распределить её во времени, тем самым уменьшая нагрузку на вод-

² Источник: Renata Rimšaitė. Crop diversity as an economic water strategy / <https://irrigationtoday.org/features/crop-diversity-as-an-economic-water-strategy/> Опубликовано 22.04.2026

ные ресурсы в критические периоды. Это особенно важно в условиях снижения дебита скважин, сокращения квот на водопользование или роста стоимости водозабора.

С экономической точки зрения диверсификация сельскохозяйственных культур также может способствовать стабилизации доходов фермерских хозяйств за счёт снижения зависимости от одного рынка. Хотя альтернативные культуры не всегда обеспечивают более высокую урожайность по сравнению с традиционными культурами в каждый отдельный год, они позволяют уменьшить зависимость от колебаний цен на один вид продукции или от изменений аграрной политики. Таким образом, разнообразие сельскохозяйственных культур потенциально обеспечивает большую гибкость как в использовании водных ресурсов, так и в формировании источников дохода, способствуя снижению производственных рисков и повышению общей устойчивости сельского хозяйства.

Однако для многих производителей, использующих орошение, внедрение новых культур или переход к их выращиванию зачастую представляет собой сложный и затратный процесс структурной перестройки. Такие изменения могут требовать новых агрономических знаний, пересмотра технологий производства и режимов орошения, приобретения дополнительного оборудования, а также установления новых каналов сбыта. Это, в свою очередь, увеличивает потребность в консультационной поддержке и кредитных ресурсах и может создавать дополнительные сложности, связанные с организацией труда. Например, системы орошения часто оптимизируются под выращивание одной конкретной культуры, что делает их адаптацию к новым условиям дорогостоящей или технически сложной с точки зрения эксплуатации.

В настоящее время рыночная неопределённость играет важную роль в производстве многих сельскохозяйственных культур. Однако внедрение новых культур может усиливать эту неопределённость из-за отсутствия стабильных местных покупателей, недостаточной прозрачности цен или ограниченных возможностей страхования урожая. В результате такие риски могут перевешивать потенциальные долгосрочные выгоды, включая более рациональное использование водных ресурсов, особенно для производителей с низкой рентабельностью. Даже если диверсификация культур способствует повышению долгосрочной устойчивости, краткосрочные риски трудно компенсировать без чётких стратегий управления, технической поддержки и финансовых механизмов.

Например, нормы водопользования, меры стимулирования рационального использования водных ресурсов, требования к отчётности, системы страхования урожая и кредитные программы зачастую разрабатываются с учётом традиционных систем земледелия. Если эти механизмы не

адаптированы к условиям диверсифицированных систем, производители могут сталкиваться с более высокими издержками соблюдения нормативных требований, а также с ограничением гибкости, что сдерживает инновации и повышает производственные риски.

В рамках более широкого подхода к управлению рисками диверсификация сельскохозяйственных культур может способствовать повышению экономической устойчивости орошаемого земледелия. Однако она не является самостоятельным решением проблемы дефицита водных ресурсов. Ключевая задача заключается в обеспечении согласованного взаимодействия политики, технологий и рыночных механизмов таким образом, чтобы внедрение диверсифицированных систем было для производителей экономически и организационно осуществимым.

Экспертный центр по интеллектуальным дождевальным машинам создан в Бразилии для масштабирования технологий по всему миру³

Компания Komet Irrigation инвестировала значительные средства в создание Департамента прикладной инженерии и цифровых систем, переходя от производства форсунок к разработке интеллектуальной экосистемы полива. Инициатива направлена на устранение «слепых зон» в работе поворотных дождевальных машин за счет внедрения датчиков реального времени и аналитики для точного орошения.

Поворотные дождевальные машины (в мировой практике их называют круговыми пивотами от англ. Center Pivot) — это огромные автоматизированные системы полива, которые совершают революцию в промышленном фермерстве. Внешне они выглядят как длинная металлическая ферма (от 100 до 800 и более метров), установленная на самоходных колесных тележках. Одна точка конструкции жестко закреплена в центре поля (там находится вышка подачи воды), а вся остальная «стрела» медленно движется по кругу, поливая урожай сверху подобно гигантскому искусственному дождю. Именно благодаря этим машинам на спутниковых снимках полей во всем мире видны красочные зеленые круги.

³ Источник: <https://www.agroxxi.ru/selhoztehnika/novosti/yekspertnyi-centr-po-intellektualnym-dozhdevalnym-mashinam-sozdan-v-brazilii-dlja-masshtabirovaniya-tehnologii-po-vsemu-miru.html> Опубликовано 29.06.2026

Новое подразделение прикладной инженерии и цифровых систем, а также центр обмена опытом Comet Irrigation будут генерировать актуальные во всем мире аналитические данные для развития науки, техники и принятия решений в области орошения с использованием поворотных систем.

До недавнего времени пивоты оставались исключительно механическими гигантами: они просто вращались и распыляли воду с одинаковой интенсивностью.

Компания Comet и другие лидеры по производству оросительных круговых систем инвестируют в их цифровизацию, чтобы решить фундаментальные проблемы современного земледелия:

1. Ликвидация «слепой зоны» в данных (The Data Gap)

Ученые научились оцифровывать многое в растениеводстве: состав почвы, индекс здоровья листьев (NDVI) со спутников, объемы внесения удобрений. Но то, что происходит с водой в момент падения из форсунки на землю, оставалось скрыто. Машина может работать, но из-за износа форсунок, изменения давления в трубе или сильного ветра вода распределяется неравномерно. Интеллектуальный пивот с датчиками в реальном времени сообщает, сколько влаги долетело до корней, а сколько испарилось.

2. Дифференцированный полив (Variable Rate Irrigation — VRI)

Поле редко бывает однородным: в одном месте может быть песчаный склон (где вода быстро уходит), а в другом — глинистая низина (где образуются лужи и гниют корни). Обычная машина заливает оба участка одинаково. Умная машина знает карту поля. Проезжая над песчаным участком, она ускоряет подачу воды, а над низиной — прикрывает форсунки, экономя колоссальные объемы ресурсов.

3. Предотвращение разрушения почвы и болезней

Если капли воды слишком крупные, они разбивают верхний слой почвы, превращая его в плотную корку, которая не дышит и не впитывает влагу (вода просто стекает в низины, вызывая эрозию). Интеллектуальные системы Comet анализируют параметры давления и подстраивают конфигурацию распылителей так, чтобы размер капель и кинетическая энергия удара были идеальными для конкретной фазы роста культуры.

4. Экономия водных и энергетических ресурсов

Качать воду под огромным давлением на сотни метров — это колоссальные затраты на электроэнергию или дизельное топливо. Интеллектуальный контроль позволяет снизить рабочее давление в системе без потери качества полива. Машина поливает ровно столько, сколько нужно растениям, предотвращая дефицит пресной воды в засушливых регионах.

Компания Komet Irrigation официально не раскрывает точную сумму инвестиций в цифрах, однако в официальных отчетах и релизах этот проект обозначается как шестизначные инвестиции (в долларах/евро).

На эти средства компания профинансировала создание совершенно нового международного Департамента прикладной инженерии и цифровых систем (Application Engineering & Digital Systems); строительство и запуск самого высокотехнологичного центра Komet Experience Hub в Паулинии (штат Сан-Паулу, Бразилия); комплектацию центра передовым лабораторным оборудованием для тестирования дождевальных машин, симуляторами реального времени и цифровыми инструментами мониторинга.

Бразилия была выбрана для этого центра потому, что Komet уже контролирует порядка 35% местного рынка круговых дождевальных машин (пивотов). При этом сама компания подчеркивает, что хотя деньги вложены в бразильскую площадку, разрабатываемые там цифровые интеллектуальные технологии будут внедряться на фермах по всему миру.

Систему умного полива на случай внезапной засухи разрабатывают ученые для интенсивных яблоневых садов⁴

Исследователи разработали систему автоматического полива для определения точных порогов засухи у яблонь на подвое Б-9, реагируя на учащение «внезапных засух». Эксперимент показал, что критический стресс наступает при падении матричного потенциала почвы до -60...-80 кПа, что требует индивидуальной настройки датчиков для разных сортов, а не единых стандартов. Матричный потенциал почвы (или матричное давление) — это сила, с которой твердые частицы почвы (глина, песок, гумус) удерживают вокруг себя воду. Она показывает, насколько прочно влага «связа-

⁴ Источник: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/novosti-nauki/sistemu-umnogo-poliva-na-sluchai-vnezapnoi-zasuhi-razrabatyvayut-uchenye-dlja-intensivnyh-jablonevyh-sadov.html> Опубликовано 29.06.2026

на» с почвой и какое усилие нужно приложить корням растения, чтобы эту воду впитать.

Поскольку засуха и неопределенность в отношении водных ресурсов оказывают все большее давление на садоводческие системы, исследователи из Аппалачской исследовательской станции плодоводства Службы сельскохозяйственных исследований Министерства сельского хозяйства США в Кернисвилле, Западная Вирджиния, начали исследование в ответ на большой интерес производителей к тому, как современные подвои яблони ведут себя в условиях засухи. Производители яблок искали более четкие, научно обоснованные ответы на вопрос о том, какие подвои могут лучше себя показывать в условиях ограниченного водоснабжения, особенно по мере расширения систем интенсивного производства и снижения предсказуемости погоды.

Яблони по-разному реагируют на засуху. Подвой — нижняя часть привитого дерева — играет важную роль в определении того, насколько хорошо дерево переносит водный стресс. Результаты исследования показывают, что яблоневые подвои значительно различаются по своей способности переносить длительную засуху. Были обнаружены различия в эффективности использования воды, регуляции роста и физиологических показателях стресса по мере снижения влажности почвы. Некоторые подвои демонстрировали более стабильные показатели при уменьшении полива, в то время как другие проявляли ранние стрессовые реакции по мере усиления засухи.

Результаты исследования подчеркивают важность выбора подвоя как практического инструмента управления садами в условиях ограниченного водоснабжения. Подходы к орошению, основанные на пороговых значениях, использованные в исследовании, демонстрируют, как садоводы могут экономить воду, минимизируя при этом негативное воздействие на продуктивность деревьев, особенно в сочетании с засухоустойчивыми подвоями.

Проект, возглавляемый доктором Эндрю М. Бирером и доктором Лизой Танг при поддержке сотрудницы Вирджинского технологического университета Кэролайн Уолкотт и стажерки программы Biological Science Aid Камрин Виандс, представляет собой инновационный подход, который постепенно создавал засушливый стресс в течение шести недель с помощью открытой платформы орошения Open_Irr и почвенных условий, более точно имитирующих условия в садах. Сотрудники Вирджинского технологического университета и Министерства сельского хозяйства США внесли свой вклад, предоставив экспертные знания в области почвоведения, физиологии растений и технологий орошения. Исследование предоставляет практическую, научно обоснованную информацию, которая поможет фер-

мерам в выборе подвоев и управлении орошением в условиях все более изменчивого климата.

Поскольку изменчивость климата и нехватка воды продолжают создавать проблемы для систем выращивания фруктов, данное исследование предоставляет основанные на данных рекомендации по повышению эффективности орошения и поддержанию производства яблок в периоды длительной засухи.

«Фактически, эта работа была напрямую вызвана интересом заинтересованных сторон к изучению реакции современных подвоев яблони на засуху, что было поддержано Ассоциацией садоводов штата Пенсильвания в рамках соглашения 58-8080-3-004. Вторым фактором, побудившим к работе, стала разработка системы управления орошением с открытым исходным кодом Open_Irr, которая облегчила создание засухи во время испытаний. Платформа Open_Irr позволяет нам внедрять пороговое управление водными ресурсами в наших исследованиях, что представляет большой интерес для всей отрасли выращивания специализированных сельскохозяйственных культур», — сказал Бирер.

В исследовании ученых из изучался карликовый подвой Будаговский 9 (Б-9), на который были привиты популярные товарные сорта яблони. В смежных тестах платформы Open_Irr также оценивались другие современные клоновые подвои, такие как Б-10, G-11 (Geneva 11) и G-969.

Выбор подвоя Б-9 (Budagovsky 9) в качестве базового был продиктован несколькими важными причинами. Подвой Б-9 (выведенный в России профессором Будаговским) является одним из самых популярных, массовых и коммерчески успешных карликовых подвоев в интенсивном садоводстве как в России, так и в США. Он идеально подходит для современных шпалерно-карликовых садов с высокой плотностью деревьев на гектар. Исследовать его реакцию требовал сам бизнес.

Б-9 ценится садоводами за выдающуюся зимостойкость (что редкость для карликовых подвоев). Будучи строго карликовым, Б-9 имеет небольшую, мочковатую и поверхностно расположенную корневую систему. Он физически не может «дотянуться» до глубоких грунтовых вод. Сады на Б-9 критически зависят от искусственного орошения. Любой сбой в поливе или «внезапная засуха» бьют по нему в первую очередь, что делает его важным модельным объектом для калибровки датчиков влажности.

В целом, исследование показало, что универсальные стандарты полива неэффективны для интенсивных садов, так как реакция на засуху зависит от комбинации подвоя и привойного сорта, а критический стресс наступает резко при матричном потенциале -60...-80 кПа. Значение работы заключается в переходе к цифровому управлению орошением на основе

реальных потребностей дерева, что позволяет защитить урожай от резких засух и экономить ресурсы.

Почвы, их восстановление и борьба с деградацией

Китай разработал технологию превращения пустынного песка в плодородную почву за 10 месяцев⁵

Эрик Раллс

Биологические почвенные корки — это тонкие живые слои организмов, формирующиеся на поверхности пустынной почвы. Их нередко называют «живой кожей» пустыни, поскольку они играют важную роль в защите и стабилизации грунта.

В естественных условиях такие корки проходят три основные стадии развития: от простых цианобактерий к лишайникам и далее к зрелой стадии, на которой преобладают мхи.

Ученые разработали технологию, позволяющую ускоренно формировать такие корки и тем самым замедлять процессы опустынивания. В основе метода — использование выращенных в лаборатории микроорганизмов, которые связывают рыхлый песок в тонкий, но устойчивый слой, менее подверженный выдуванию ветром.

Образующееся защитное покрытие дает возможность специалистам по восстановлению экосистем высаживать кустарники и травы. Это повышает шансы молодых растений на выживание в условиях сильных ветров и высоких температур пустыни.

Биологическая почвенная корка

На соломенных «шахматных» настилах, используемых для закрепления песков на северо-западе Китая, после сезонных пыльных бурь на обработанной поверхности формировалась тёмная плёнка, которая сохранялась и после их окончания.

⁵ Источник: Eric Ralls. China invents game-changing process that turns desert sand into fertile soil in just 10 months / <https://www.earth.com/news/lab-grown-cyanobacteria-microbes-turn-desert-sand-into-fertile-soil-in-just-10-months/> Опубликовано 21.05.2026

Наблюдая за этими процессами в условиях перепадов температур — от жары до заморозков, — ученые Китайской академии наук задокументировали скорость формирования и затвердевания этой плёнки.

В ходе полевых испытаний вблизи пустыни Такла-Макан в Синьцзяне специалисты Китайской академии наук установили, что почвенная корка стабилизируется в течение 10–16 месяцев.

Даже при сравнительно высокой скорости формирования корки исследователи подчеркивают, что на первом этапе ключевое внимание уделяется созданию устойчивого почвенного основания. Это необходимо для того, чтобы в дальнейшем растения могли укорениться и выживать без необходимости постоянной пересадки.



Древние цианобактерии

Задолго до появления лесов цианобактерии — микроорганизмы, способные к фотосинтезу и выживающие в экстремальных условиях, — вероятно, возникли около 3,5 млрд лет назад.

Используя солнечный свет, воду и углекислый газ, они синтезируют органические вещества, формируя основу для развития других форм жизни.

В бедных питательными веществами пустынных почвах некоторые виды цианобактерий способны фиксировать азот, превращая атмосферный азот в соединения, доступные для растений, тем самым обогащая почву.

Закрепляясь на поверхности, они образуют живой слой, который связывает рыхлые песчаные частицы и создает более благоприятные условия для укоренения первых растений.

Связывание песка липкими сахарами

Под микроскопом биологические почвенные корки — тонкие живые слои на поверхности почвы — выглядят как сеть бактериальных нитей, оплетающих песчинки.

Чтобы эта структура сохраняла целостность, микроорганизмы выделяют между частицами особые липкие полисахариды. Со временем они затвердевают, формируя тонкий, но прочный сплошной слой.

Такая корка действует как природный «клей»: она скрепляет песчинки, снижает их подвижность и затрудняет закрепление инвазивных видов растений.

Однако поверхность легко повреждается — следами людей, транспортом или механической очисткой. Поэтому восстановление и сохранение почвенных корок в больших масштабах требует не только их формирования, но и долгосрочной защиты.

Накопление углерода и формирование почвы

В течение первого года обработанная поверхность начала удерживать питательные вещества в верхнем слое толщиной около одного дюйма, предотвращая их выдувание ветром вместе с пылью.

В результате смешения минеральной пыли, переносимой ветром, отмерших клеток и выделяемых микроорганизмами сахаров формировалось органическое вещество. Это способствовало накоплению ключевых элементов питания, таких как азот и фосфор.

По мере роста концентрации питательных веществ увеличивалось и разнообразие микроорганизмов, а сама почвенная корка становилась более устойчивой к внешним воздействиям.

Для молодых растений такие изменения создавали более благоприятные условия для прорастания, однако их дальнейшее выживание по-прежнему зависело от своевременных осадков.

Удержание влаги в почве

После кратковременных дождей сформировавшаяся почвенная корка удерживала влагу ближе к поверхности, тогда как соседний голый песок быстро пересыхал.

Шероховатая структура пор и тёмные пигменты снижают испарение, поскольку вода сохраняется в затенённых участках и задерживается под тонким поверхностным слоем.

Даже дополнительные несколько дней сохранения влаги могут существенно повысить шансы трав и кустарников укорениться до наступления жары.

В условиях продолжительных засух биологическая почвенная корка способна переходить в состояние покоя, поэтому эффективность её работы во многом зависит от климатических условий и правильного выбора времени вмешательства.

Формирование сообщества и экологическая преемственность

Со временем биологическая почвенная корка изменилась: из преимущественно микробного покрова она превратилась в смешанную систему, включающую лишайники и небольшие участки мха.

Лишайники повышают прочность поверхности, а их медленный рост помогает сохранять целостность корки при сильных ветрах и перепадах температуры, включая холодные ночи.

Мох создаёт дополнительную микроструктуру и тень, благодаря чему в небольших скоплениях влаги поддерживаются условия, благоприятные для развития новых микроорганизмов.

С появлением этих «партнёров» экосистема становится более устойчивой, однако восстановление повреждённых участков требует больше времени.

Рекорд 59 лет наблюдений

За современными ускоренными испытаниями стоит многолетний опыт Китая, который отслеживает восстановление почвенных корок в пустынных районах на протяжении 59 лет.

Используя образцы корок известного возраста, исследователи сравнивали нетронутые участки с территориями, обработанными выращенными в лаборатории цианобактериями.

Анализ показал, что рост содержания питательных веществ напрямую связан с доминирующими группами микроорганизмов. При внесении цианобактерий многолетний процесс формирования корки может сокращаться до нескольких лет.

Однако даже в наиболее благоприятных условиях формирование зрелой, устойчивой к внешним воздействиям почвенной корки занимает в среднем от двух до трёх лет.

Снижение ветровой эрозии

Ветер является одним из самых разрушительных факторов для пустынных почв: голый песок легко разрушается и переносится при сильных порывах.

После обработки цианобактериями частицы песка связываются в единую структуру, и сформировавшаяся корка удерживает их на месте, снижая количество поднимаемой в воздух пыли.

В лабораторных испытаниях искусственно созданная почвенная корка позволила снизить ветровую эрозию более чем на 90% в контролируемых условиях.

Сокращение переноса песка ветром может способствовать уменьшению частоты песчаных бурь и увеличению срока службы инфраструктуры. Однако такие почвенные системы должны также выдерживать механические нагрузки, включая транспортное воздействие и выпас скота.

Ограничения метода

Расширение применения технологии за пределы отдельных участков требует сложных решений о том, где именно следует вносить микроорга-

низмы, поскольку не каждой песчаной дюне необходимо формирование почвенной корки.

Местные штаммы микроорганизмов, как правило, лучше адаптированы к жаре, засухе и высокой солёности, чем привнесённые извне, поэтому исследовательские группы чаще используют культуры, выделенные из близлежащих пустынных экосистем.

Поскольку опустынивание — процесс деградации земель, сопровождающийся утратой растительного покрова и превращением территорий в пустынные ландшафты — имеет комплексные причины, биологические почвенные корки не могут решить такие проблемы, как чрезмерный выпас скота или нерациональное водопользование.

Кроме того, без защиты от транспортных средств и интенсивного пешеходного воздействия восстановленный почвенный слой может быть легко разрушен, а его формирование потребует повторного времени восстановления — иногда в течение нескольких лет.

Перспективы дальнейшего развития

Ускоренное формирование почвенной корки превращает рост микроорганизмов в практический инструмент, связывающий контроль над подвижными песками с более медленными процессами восстановления растительного покрова.

Долгосрочный мониторинг позволит определить, сохраняются ли устойчивость, эффективность и возможные побочные эффекты технологии в различных пустынных экосистемах и климатических зонах.

В Воронеже создали гидрогель для регулирования влажности почвы⁶

Ученые Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ) разработали гидрогель для полей, огородов и комнатных растений, 1 г которого способен впитать несколько литров воды, а по мере высыхания почвы - постепенно отдавать накопленную влагу растениям. Вещество поможет повысить эффективность АПК в регионах рискованного земледелия, сообщили ТАСС в пресс-службе вуза.

⁶ Источник: <https://tass.ru/nauka/27229601> Опубликовано 27.04.2026

"Научной группой Воронежского государственного университета инженерных технологий синтезированы новые сополимеры на основе полисахаридов и акриловой кислоты, один грамм которых способен поглощать до нескольких литров воды", - сообщили в пресс-службе.

Как пояснили в вузе, биоматериалы - биопленки, биокомпозиты и биополимеры - способствуют "зеленой" трансформации сельского хозяйства благодаря биоразлагаемости и низкой токсичности, но их применение ограничено из-за сложностей с регулированием влажности почвы. Ученые ВГУИТ по заказу китайской компании Xuzhou Zhongyan Meihui Information Technology Co. Ltd разработали решение на основе сополимеров хитозана. "Такие сополимеры называют гидрогелями в связи с их способностью поглощать воду в количествах, значительно превышающих массу самого полимера. В настоящее время в качестве таких регуляторов влажности почвы в основном используются синтетические полиакрилатные гидрогели", - сообщили в пресс-службе.

Первоначально в лабораторных условиях ВГУИТ были получены гидрогели на основе хитозана (природного полисахарида, получаемого из панциря ракообразных) и акриловой кислоты. Затем ученые синтезировали гидрогели уже на основе отечественного сырья - пектина в качестве природного полисахарида, а также разработали технологию их синтеза в реакторах большого объема.

"В отличие от полиакрилатных, наши сополимеры синтезированы на основе функциональных биополимеров - полисахаридов. В зависимости от соотношения синтетической и природной составляющих 1 грамм наших гидрогелей может поглощать не менее двух литров воды. Один из вариантов применения таких гидрогелей - регулирование влажности почвы: при избытке влаги гидрогель поглощает и удерживает избыточную влагу, при наступлении засушливого периода - отдает влагу растению", - пояснил один из авторов разработки, профессор кафедры физической и аналитической химии ВГУИТ, доктор химических наук Павел Суханов.

По его словам, при введении в почву гидрогели могут использоваться для регулируемой доставки растениям минеральных и органических удобрений. Они эффективно поглощают воду, биоразлагаемы (превращаются в безвредные для биоты почвы соединения спустя некоторое время) и при этом обладают высокой механической прочностью и химической стабильностью. Благодаря меньшему содержанию синтетических компонентов, такие гидрогели наносят существенно меньший урон окружающей среде, и, кроме применения в сельском хозяйстве, показали себя как эффективные гемостатики.

Апробация разработки

Группой молодых ученых-биотехнологов ВГУИТ идентифицированы консорциумы микроорганизмов, которые позволяют переработать синтетическую составляющую гидрогелей в почве до простейших соединений. Разработка, лицензия на которую приобретена китайскими партнерами, усовершенствована учеными ВГУИТ с учетом использования отечественного сырья и апробирована при выращивании комнатных растений. Накануне отъезда в командировку или отпуск достаточно обильно полить растения водой или раствором с удобрениями: лишняя влага будет удерживаться гидрогелем, а при подсыхании почвы он постепенно отдаст сорбированную воду.

С новым недорогим способом можно протестировать аграрную почву всего мира на содержание пластика⁷

Австралийские исследователи разработали новый «золотой стандарт» для анализа почвы с извлечением микропластика, что открывает возможность проверить огромных объём сельхозугодий в любой точке мира на пластиковое загрязнение для принятия мер.

В австралийском Университете Новой Англии (UNE) исследовательская группа под руководством аспирантки Ниветы Сивараджа разработала новую многокритериальную модель для определения наиболее эффективного метода извлечения шести распространенных типов пластика из различных типов почвы. Результаты исследования опубликованы в журнале *Soil Advances*.

Благодаря учету таких факторов, как степень извлечения, спектральная целостность, время экстракции, стоимость и воздействие на окружающую среду, предложенный метод является доступным и недорогим, что позволяет применять его ученым в любой точке мира.

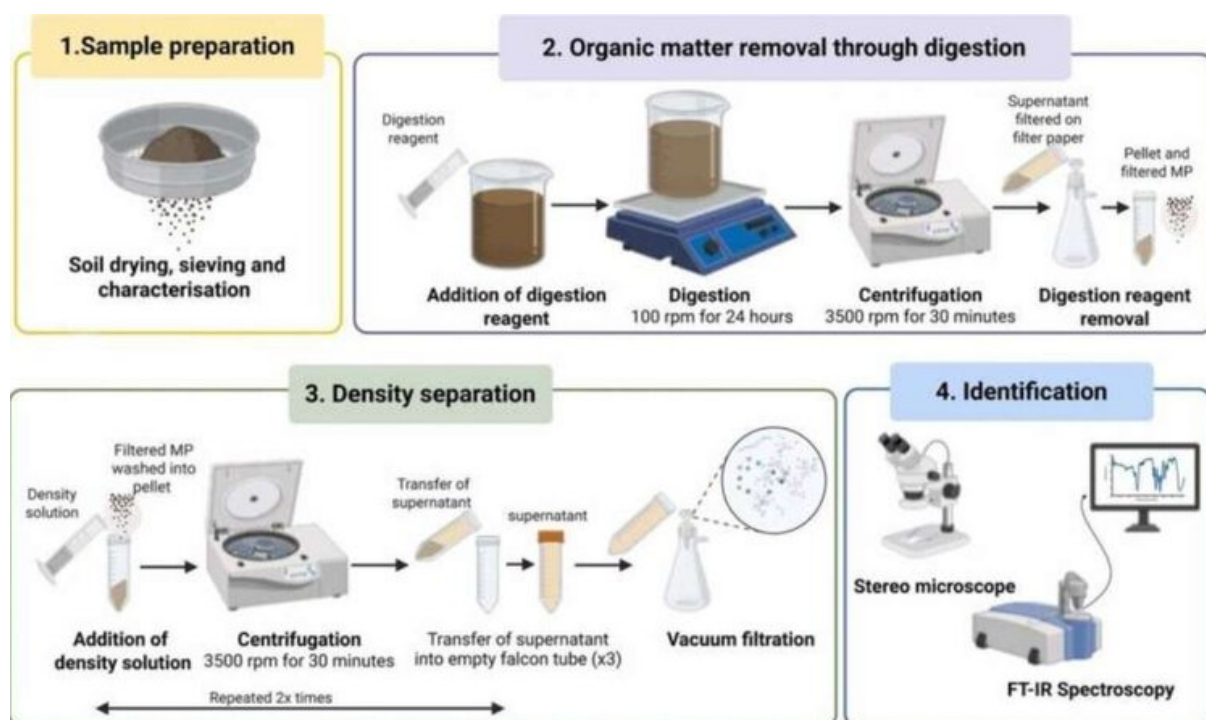
«В настоящее время у нас нет стандартного метода для тестирования на этот вид загрязнения, поэтому, как только этот метод будет принят, его можно будет использовать для лучшего понимания истинных масштабов загрязнения сельскохозяйственных почв микропластиком», — сказала Нивета.

⁷ Источник: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/novosti-nauki/novym-nedorogim-sposobom-mozhno-protestirovat-agrarnuyu-pochvu-vsego-mira-na-soderzhanie-plastika.html> Опубликовано 30.04.2026

Сельскохозяйственные почвы сильно загрязнены пластиком из мульчирующих пленок, биоотходов, осадка сточных вод и затеняющих сеток, которые со временем разлагаются, образуя микропластик. Это представляет собой серьезную угрозу для продовольственной безопасности, здоровья почвы, урожайности сельскохозяйственных культур и загрязнения грунтовых вод.

«Это оказывает значительное воздействие на окружающую среду, может передаваться по пищевой цепи и угрожать здоровью человека», — сказала Нивета.

Оптимизированный метод экстракции, разработанный коллективом исследователей, включает в себя последовательность этапов: разложение органических веществ с последующим разделением по плотности, что позволяет достичь степени извлечения более 92%. Процесс быстрый, недорогой (примерно 5,47 австралийских долларов за образец) и использует реагенты с низким воздействием на окружающую среду.



«В нашем методе было важно учитывать стоимость, поскольку чем дешевле он, тем выше вероятность его внедрения, что особенно важно в регионах мира с низким социально-экономическим уровнем», — сказала Нивета.

Хотя это исследование закладывает основу для разработки учеными глобальных стандартов, Нивета уже готовится к следующему этапу своих

исследований. В настоящее время она применяет свой метод к образцам почвы, собранным в Шри-Ланке, для изучения количества микропластика на рисовых полях страны. Нивета также будет изучать миграцию микропластика через различные слои почвы, особенно в районах, где используется компост из твердых бытовых отходов.

«Я рада продолжить работу в исследовательской группе по изучению загрязнения окружающей среды в Университете Новой Англии и проверить этот метод в реальных условиях, а также внести свой вклад в новаторские исследования, направленные на защиту здоровья человека, продовольственной безопасности и планеты», подчеркнула исследователь.

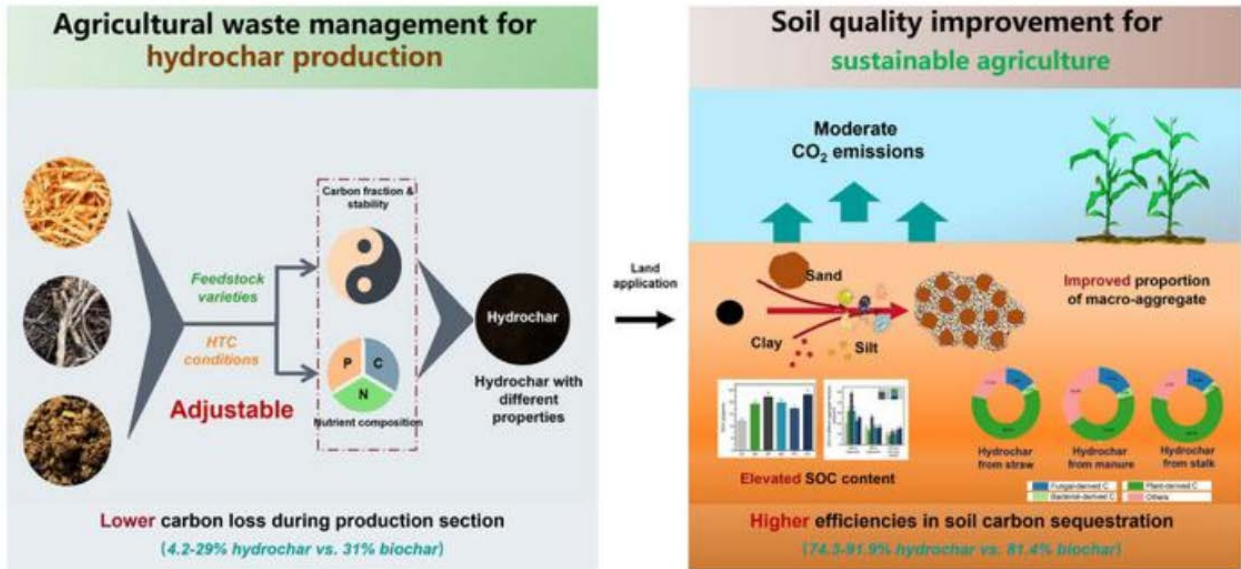
Ученые нашли способ улучшить почву с помощью гидроугля⁸

Новое исследование показало, что гидроуголь — материал, богатый углеродом и получаемый из влажной биомассы, — может заметно улучшить состояние почвы. В отличие от распространенных добавок (соломы, навоза, обычного биоугля), он одновременно повышает содержание углерода и улучшает структуру почвы.

Гидроуголь создают методом гидротермальной карбонизации: влажную органическую биомассу превращают в твердое углеродное вещество при умеренной температуре и давлении. В нем есть два типа углерода: один стимулирует активность микробов, другой долго сохраняется в почве.

Ученые проверили гидроуголь на распространенном типе сельскохозяйственных почв в Китае, сравнив его с кукурузной соломой и биоуглем из соломы. Они использовали гидроуголь, сделанный из разных материалов: кукурузной соломы, свиного навоза и стеблей зантоксилума. Лучшее всего показал себя гидроуголь из стеблей зантоксилума: он хорошо удерживал углерод и укреплял структуру почвы. Гидроуголь из навоза дал больше питательных веществ и увеличил содержание углерода в микробной биомассе.

⁸ Источник: <https://science.mail.ru/news/50245-selskoe-hozyaistvo-buduschego/> Опубликовано 1.06.2026



Гидроуголь как эффективная добавка для улучшения агрегации почвы и связывания углерода: данные сравнительных микроскопических экспериментов

Благодаря гидроуглю в почве стало больше крупных стабильных частиц — макроагрегатов, которые защищают углерод от быстрого разложения. Это повышает стабильность почвы и помогает ей удерживать воду, питательные вещества, противостоять эрозии.

Таким образом, превращая сельскохозяйственные и животноводческие отходы в гидроуголь, фермеры могут улучшить качество почвы и сократить выбросы углерода. Выбор сырья для гидроугля можно подстраивать под конкретные задачи: например, навоз подойдет для обогащения почвы питательными веществами, а стебли растений — для долговременного удержания углерода.

Как псевдомонады помогут спасти засоленные почвы мира и вернуть их в сельскохозяйственный оборот⁹

По данным ООН, более двадцати процентов всех орошаемых земель в мире уже страдают от избытка соли, и эта цифра продолжает расти. Ранее такие территории считались потерянными для эффективного фермерства, либо требовали колоссальных финансовых затрат на химическую мелиорацию и промывку почв. Последние исследования доказывают, что биологический метод с использованием псевдомонад — это доступная, дешевая и экологически чистая альтернатива, способная вернуть деградировавшие земли в сельскохозяйственный оборот. И такие биопродукты представлены на рынке. Но чтобы они стали массовыми, предстоит еще решить несколько задач, в чем агронауке помогает ИИ.

Почвенные бактерии из рода псевдомонад заслуженно признаны одними из самых эффективных защитников сельскохозяйственных культур от пагубного воздействия засоления почв. Избыточная концентрация солей, особенно хлорида натрия, создает для растений двойную угрозу: осмотический стресс, мешающий корням впитывать воду, и токсическое отравление ионами натрия. В этих условиях псевдомонады выступают в роли естественных биопротекторов. Их способность снижать стресс у растений базируется на сложном комплексе биохимических и генетических механизмов, которые активно изучаются учеными по всему миру.

Один из ключевых способов защиты связан с регуляцией растительных гормонов. При наступлении стресса растения начинают усиленно вырабатывать этилен — гормон старения, избыток которого тормозит рост корней и приводит к увяданию. Многие штаммы псевдомонад синтезируют особый фермент — АМК-дезаминазу, которая расщепляет предшественник этилена. Это позволяет растению сохранить нормальную архитектуру корневой системы даже в соленой среде. Кроме того, бактерии сами вырабатывают ауксины, стимулирующие деление клеток и ускоряющие затягивание повреждений.

Другой важнейший механизм — поддержание ионного баланса и предотвращение окислительного шока. Засоление вызывает накопление активных форм кислорода, которые разрушают клеточные мембраны растений. Псевдомонады активируют собственную антиоксидантную систему хозяина, стимулируя выработку таких ферментов, как каталаза и супероксиддисмутаза, нейтрализующих опасные радикалы. Бактерии также помо-

⁹ Источник: <https://www.agroxxi.ru/gazeta-zaschita-rastenii/zrast/kak-psevdomonady-pomogut-spasti-zasolennye-pochvy-mira-i-vernute-ih-v-selskohozjaistvennyi-oborot.html> Опубликовано 25.06.2026

гают удерживать калий внутри растительных клеток, блокируя избыточное поглощение токсичного натрия.

Свежие международные исследования раскрывают совершенно новые грани этого взаимодействия.

Так, масштабное исследование ученых из Китая, опубликованное в журнале *Science Advances*, показало, что присутствие псевдомонад коренным образом меняет структуру растительных тканей. В ходе экспериментов с дикой и культурной соей было доказано, что эти бактерии стимулируют у растений биосинтез лигнина — прочного полимера, укрепляющего клеточные стенки корней. Такой укрепленный барьер физически препятствует проникновению солей внутрь растения. Генетический анализ подтвердил, что псевдомонады активируют у сои специфические гены, отвечающие за одревеснение тканей, причем этот защитный механизм оказался универсальным для различных типов почв.

Параллельно в Южной Корее исследовательская группа изучила эндофитный штамм *Pseudomonas* sp. JBR1, который обитает непосредственно внутри тканей хозяина. На примере пекинской капусты ученые продемонстрировали, что бактерия не только снижает уровень токсичных ионов и запускает выработку защитных антиоксидантов, но и перестраивает всю структуру ризосферного микробиома. Заселение корней этим штаммом привлекало другие полезные почвенные микроорганизмы, формируя вокруг корней устойчивый защитный конклав.

Схожие результаты получили исследователи из Египта, изучавшие влияние бактерии *Pseudomonas putida* на урожайность репчатого лука в условиях экстремального засоления. Эксперименты выявили выраженный синергетический эффект при совместном использовании псевдомонад и эндомикоризных грибов. Растения, обработанные бактериями, показали колоссальный прирост биомассы и урожайности луковиц по сравнению с необработанным контролем, поскольку микроорганизмы смогли полностью компенсировать осмотическое давление соли.

Не менее важная работа была проведена учеными из Индии и США, исследовавшими выносливость сорго — стратегически важной засухоустойчивой культуры. Применение галотолерантного штамма *Pseudomonas stutzeri* помогло культуре сохранить высокий уровень хлорофилла и каротиноидов в листьях, предотвращая разрушение фотосинтетического аппарата солью. Это подтверждает, что использование почвенных псевдомонад является одной из самых перспективных и экологически безопасных стратегий для восстановления деградировавших и засоленных сельскохозяйственных угодий по всему миру.

На рынке уже присутствуют десятки зарегистрированных биопрепаратов. Они выпускаются как для крупных агрохолдингов, так и для част-

ных хозяйств в виде биофунгицидов и стимуляторов роста. В процессе производства заводы нередко комбинируют несколько штаммов псевдомонад или добавляют в состав продукты их жизнедеятельности — очищенные природные антибиотики, сидерофоры (связывающие железо соединения) и фитогормоны, что позволяет препарату защищать культуру сразу от нескольких стресс-факторов одновременно.

Ограниченное внедрение препаратов на основе псевдомонад в массовый агробизнес связано с их биологической уязвимостью по сравнению со стабильной «быстрой» агрохимией.

Псевдомонады относятся к грамотрицательным бактериям, которые не умеют образовывать защитные споры, из-за чего они массово погибают при температурных колебаниях на складах и имеют короткий срок годности (до 6–12 месяцев). Попадая в реальное поле, заводские штаммы часто проигрывают конкуренцию местной агрессивной микрофлоре или погибают от солнечного ультрафиолета. Кроме того, они несовместимы в одном баке с химическими фунгицидами, а их накопительный защитный эффект проявляется медленно, что заставляет крупных фермеров выбирать предсказуемые и долго хранящиеся минеральные удобрения и агрохимические мелиоранты.

Чтобы преодолеть эти барьеры, современные лаборатории ведут активные технологические и генетические доработки препаратов.

Ученые разрабатывают методы нанокапсулирования, заключая бактерии в микроскопические оболочки из натуральных полимеров (альгината натрия или хитозана), которые защищают клетки от внешней среды и обеспечивают их дозированное высвобождение прямо к корням.

Параллельно методами биотехнологии выводятся галотолерантные (солеустойчивые) и термостабильные штаммы, способные выживать в экстремальном климате. Также создаются полиштаммовые консорциумы — смеси псевдомонад с другими полезными микроорганизмами и аминокислотами, что помогает бактериям быстрее приживаться в почве и гарантирует стабильный результат вне зависимости от типа грунта.

Подводя итог, можно сказать, что использование почвенных псевдомонад представляет собой один из самых многообещающих экологических трендов в современном мировом растениеводстве.

Способность этих микроорганизмов брать на себя роль биопротекторов, регулировать гормональный баланс растений и физически укреплять их ткани позволяет эффективно защищать стратегические продовольственные культуры от жесткого осмотического и солевого стресса. Переход от лабораторных экспериментов к реальному масштабному внедрению

долгое время сдерживался высокой чувствительностью живых бактерий к условиям хранения и жесткой конкуренцией в дикой почве.

Тем не менее, текущий кризис глобального потепления и стремительное засорение пахотных земель заставляют науку двигаться вперед быстрыми темпами.

Современные разработки в области нанокапсулирования, выведение сверхустойчивых штаммов и создание многокомпонентных микробных консорциумов успешно решают проблемы стабильности биопрепаратов. В синергии с передовыми цифровыми технологиями — такими как искусственный интеллект и высокопроизводительное фенотипирование в рамках международных инициатив — псевдомонады способны стать важным инструментом для создания устойчивых агроэкосистем будущего и гарантией глобальной продовольственной безопасности.

Почвенные бактерии могут спасти урожай от растущего кризиса засоления почв¹⁰

Андрей Ионеску

Засоление постепенно разрушает сельскохозяйственные угодья. Соль накапливается вследствие орошения, проникает в почву из-за повышения уровня моря, а в условиях изменения климата этот процесс еще больше ускоряется.

Во всем мире уже пострадали сотни миллионов гектаров земель, и масштабы проблемы продолжают увеличиваться. Большинство сельскохозяйственных культур плохо переносит засоление почв.

Вместе с тем исследование показало, что некоторые почвенные бактерии при засолении ведут себя неожиданным образом. Они концентрируются в прикорневой зоне растений, запускают цепь биологических процессов и значительно повышают устойчивость сельскохозяйственных культур к солевому стрессу.

Обнаруженный механизм оказался неожиданным и может стать одним из наиболее перспективных с практической точки зрения открытий последних лет в области сельского хозяйства.

¹⁰ Источник: Andrei Ionescu. Soil bacteria could save crops from a growing salt crisis / <https://www.earth.com/news/soil-bacteria-could-save-crops-from-a-growing-salt-crisis/> Опубликовано 25.06.2026

Исследование было проведено под руководством Яньфэня Чжэна из Китайской академии сельскохозяйственных наук при участии Джонатана Тодда из Университета Восточной Англии и других международных ученых.

В ходе работы исследовательская группа проанализировала микробиомы корней нескольких сельскохозяйственных культур, включая кукурузу, томаты и рапс, выращенных на различных типах почв. Целью исследования было выявление закономерностей в реакции растений на засоление на уровне корневого микробиома.

Влияние засоление почв

Засоление почв представляет собой не только сельскохозяйственную проблему. Орошение, обеспечивающее производство значительной части мирового продовольствия, способствует накоплению соли в почве, поскольку после испарения воды на полях остаются солевые отложения.

Повышение уровня моря приводит к проникновению соленой воды на сельскохозяйственные земли в прибрежных районах, а изменение климата ускоряет оба процесса. В результате ранее плодородные почвы постепенно становятся менее пригодными для выращивания сельскохозяйственных культур, тогда как эффективного универсального способа решения этой проблемы пока не существует.

Один из авторов исследования Джонатан Тодд отметил, что накопление соли на сельскохозяйственных угодьях является серьезной и нарастающей проблемой, обусловленной изменением климата, развитием ирригации и повышением уровня моря. По его словам, засоление подавляет рост растений, повреждает их корневую систему и существенно снижает урожайность, создавая дополнительные риски для глобальной продовольственной безопасности.

Исследователи поясняют, что растения обладают естественными механизмами защиты и во многом зависят от микробных сообществ, обитающих в прикорневой зоне, — корневого микробиома, который помогает им противостоять различным неблагоприятным факторам окружающей среды.

Вместе с тем авторы отмечают, что механизмы взаимодействия растений и корневого микробиома до сих пор изучены недостаточно. В частности, остается неясным, насколько эти взаимосвязи универсальны для различных сельскохозяйственных культур и типов почв и какие биологические процессы лежат в их основе.

Одни и те же бактерии обнаруживаются вновь и вновь

Исследование, охватившее различные сельскохозяйственные культуры и типы почв, позволило выявить устойчивую закономерность. Исследователи установили, что бактерии рода *Pseudomonas* (псевдомонады) постоянно присутствовали в прикорневой зоне растений, причем их количество особенно возрастало в условиях засоления почвы.

Такая повторяемость свидетельствует о том, что растения не случайно взаимодействуют с этими микроорганизмами, а, вероятно, активно способствуют их привлечению к корневой системе. Исследователи пришли к выводу, что высокая эффективность псевдомонад в выполнении этой функции связана с наличием у них специфических генов.

По сравнению с другими почвенными микроорганизмами псевдомонады обладают рядом генов, обеспечивающих устойчивость к высокой концентрации соли. В частности, у них были выявлены системы транспорта натрия и другие механизмы, повышающие устойчивость к солевому стрессу. Благодаря этим особенностям бактерии не только способны выживать в засоленной почве, но и эффективно функционировать в таких условиях.

Чтобы проверить роль псевдомонад, исследователи инокулировали их штаммами растения сои и оценили результаты как в тепличных условиях, так и в ходе полевых испытаний.

Эксперименты показали, что бактерии успешно колонизировали корневую систему, а обработанные растения демонстрировали более развитые корни, лучше росли и обеспечивали более высокую урожайность по сравнению с контрольными растениями, выращенными на той же засоленной почве.

Неожиданный механизм

На протяжении десятилетий считалось, что растения противостоят солевому стрессу главным образом за счет регулирования содержания натрия: они ограничивают поступление вредных ионов в чувствительные ткани и поддерживают химический баланс, необходимый для нормального функционирования.

Именно исходя из этой модели исследователи первоначально объясняли возможную роль почвенных бактерий. Однако результаты экспериментов показали, что механизм их действия оказался иным.

Исследователи установили, что бактерии стимулируют выработку лигнина — структурного полимера, который укрепляет клеточные стенки растений, придает им жесткость и обеспечивает механическую прочность тканей.

У растений, обработанных бактериями и подвергшихся солевому стрессу, содержание лигнина в корнях значительно возросло. В отдельных случаях его уровень увеличивался более чем на 30 %

По словам Джонатана Тодда, вместо того чтобы непосредственно помогать растениям справляться с избытком соли, бактерии стимулировали усиленный синтез лигнина. В результате укреплялись клеточные стенки корней, что повышало устойчивость растений к неблагоприятному воздействию засоления.

Такой механизм принципиально отличается от традиционных представлений о защите растений от солевого стресса. В данном случае устойчивость обеспечивалась не за счет ограничения проникновения соли в ткани, а благодаря повышению механической прочности клеток и их способности противостоять ее воздействию.

Подтверждение механизма

Исследовательская группа пошла дальше и выявила конкретные гены, участвующие в регуляции синтеза лигнина. Когда экспрессия этих генов искусственно усиливалась, растения успешно развивались даже в условиях засоления.

Напротив, при полном подавлении синтеза лигнина бактерии уже не могли оказать растениям положительного воздействия — даже несмотря на их присутствие и нормальную колонизацию корневой системы. Это подтвердило, что выявленная взаимосвязь носит причинно-следственный характер, а предложенный механизм выдержал строгую экспериментальную проверку.

По словам Джонатана Тодда, использование природных микроорганизмов, таких как псевдомонады, открывает возможности для разработки биологических средств обработки, которые помогут сельскохозяйственным культурам успешно расти на засоленных почвах без широкого применения химических препаратов.

Он отметил, что с учетом того, что обширные площади сельскохозяйственных земель уже пострадали от засоления, а еще большие территории находятся под угрозой, микробиологические решения могут стать од-

ним из важнейших инструментов поддержания урожайности и обеспечения продовольственной безопасности.

Точное земледелие, цифровые технологии и искусственный интеллект

Каждый сантиметр на счету¹¹

Кэти Наварра

Любое использование воды в сельском хозяйстве связано с реальными затратами — энергопотреблением, затратами на рабочую силу, износом оборудования, расходом водных ресурсов и потенциальными потерями урожая. При отсутствии регулярных измерений и контроля технического состояния оросительных систем эти затраты могут существенно возрасти.

Уэс Дайер, агроном компании IRROMETER (Риверсайд, штат Калифорния, США), указывает, что более точное согласование режимов орошения с потребностями сельскохозяйственных культур способствует стабилизации влажности почвы, снижению стрессовых факторов для растений и более равномерному развитию посевов. Он также отмечает, что получение фермерами оперативной обратной связи на основе данных в режиме реального времени обеспечивает более полное понимание текущей ситуации и способствует принятию обоснованных решений в области орошения. По его мнению, в долгосрочной перспективе такие улучшения повышают устойчивость сельскохозяйственного производства и способствуют увеличению урожайности.

В настоящее время фермеры располагают значительно более точной информацией о структуре водопотребления, чем ранее. Отмечается, что дождевальные установки кругового действия все чаще оснащаются расходомерами, датчиками давления и системами телеметрии, что позволяет осуществлять мониторинг подачи воды в режиме реального времени и сопоставлять её с потребностями сельскохозяйственных культур. Подчеркивается, что совокупное применение данных технологий дает возможность оценивать объем поданной воды, эффективность работы оросительной системы, а также степень соответствия режима орошения агропотребностям культур.

В процессе обсуждения технологий орошения, расходомеров и различных датчиков основное внимание в конечном итоге сводится к понима-

¹¹ Источник: Katie Navarra. Every inch counts / <https://irrigationtoday.org/features/every-inch-counts/> Опубликовано 22.04.2026

нию объёма подаваемой воды и равномерности её распределения по полю. Такую позицию высказывает Джейк Бим (CID, CAIS), менеджер по техническим продажам компании Reinke Manufacturing (Дешлер, штат Небраска, США).

Принятие решений в области орошения на основе данных имеет решающее значение, поскольку сельскохозяйственные производители сталкиваются со снижением рентабельности, ростом затрат на энергию и ужесточением требований к отчётности по водопользованию. Указывается, что использование совокупных данных, получаемых с помощью дождевальных установок кругового действия, позволяет сокращать количество ненужных оросительных циклов, снижать затраты на перекачку воды и электроэнергию, а также оптимизировать сроки проведения полива.

Джош Мозье (CAWM, CID), технический директор компании *Komet Irrigation Corp.* (Фримонт, штат Небраска, США), отмечает, что сокращение числа проходов с 12–13 до восьми позволяет достичь значительной экономии средств. Он также подчеркивает, что избыточное орошение связано не только с нерациональным расходом воды, но и с вымыванием из почвы важных питательных веществ, в частности азота, из корнеобитаемой зоны, что может негативно сказываться на урожайности.

Начало с измерений и проверки

Датчики, установленные на современных дождевальных установках кругового действия, генерируют значительные объемы данных. До того, как эта информация сможет быть использована для принятия решений в области орошения, оборудование должно функционировать в соответствии с проектными параметрами. Указывается, что сельскохозяйственные производители должны уметь распознавать случаи отклонения от нормальной работы, поскольку выявление реальных проблем невозможно дистанционно и требует проведения регулярных осмотров и измерений. В этой связи отмечается, что одной из причин, по которой Джейк Бим рекомендует фермерам ежемесячно проверять и фиксировать показатели давления, является возможность со временем сформировать полную картину эффективности использования водных ресурсов.

Он указывает, что изменение давления в центральной точке системы может свидетельствовать о наличии неисправности. При этом подчеркивается, что само по себе изменение давления не всегда позволяет точно определить место возникновения проблемы, однако с высокой вероятностью оно связано с дождевальными устройствами, распылителями или насосным оборудованием.

Компания *Veat* также рекомендует сельскохозяйственным производителям обращаться к дилерам для проведения проверки расхода воды. Подчеркивается, что подобная проверка позволяет выявлять засорение форсунок, утечки, неисправности насосного оборудования или повреждение отдельных компонентов системы. Указывается, что оросительное оборудование не рассчитано на неограниченный срок эксплуатации, поэтому для обеспечения оптимального режима полива требуется его регулярное техническое обслуживание. Значительная часть систем кругового орошения эксплуатируется в течение длительного времени — 30, 40 и даже 50 лет — без проведения надлежащего технического осмотра.

Дж. Бим также указывает, что комплекты для модернизации дождевальных установок отличаются относительно низкой стоимостью и обеспечивают значительный экономический эффект в долгосрочной перспективе.

Исключение догадок

Каждый датчик, установленный на дождевальных установках кругового действия, выполняет определённую функцию в оценке эффективности работы оросительной системы. Расходомеры фиксируют объём подаваемой воды, а датчики давления позволяют контролировать соответствие работы системы расчётным параметрам. Благодаря телеметрическим технологиям данная информация становится доступной удалённо, зачастую в режиме, близком к реальному времени, как отмечает Уэс Дайер.

В совокупности, как указывается, использование данных инструментов позволяет минимизировать неопределённость при формировании графиков орошения, основанных на прогнозах погоды и полевых наблюдениях. При отсутствии достоверных данных фермеры могут лишь предполагать, что запланированные оросительные мероприятия были выполнены в полном объёме и в соответствии с заданными параметрами.

Дайер отмечает, что данное обстоятельство является важным, поскольку решения в области орошения часто требуют оперативного реагирования. По его словам, возможность мониторинга процессов внесения воды и функционирования системы в режиме реального времени позволяет отказаться от предположений и обеспечивает более своевременную корректировку режимов орошения. При значительных объёмах доступных данных основная проблема заключается не в их получении, а в их интерпретации и практическом использовании. Эффективное применение данных в орошении начинается с простых решений.

В этой связи Дайер рекомендует начинать с установки небольшого количества правильно размещённых датчиков влажности почвы, сосредотачиваться на анализе тенденций, а не отдельных измерений, а также регулярно анализировать получаемую информацию. Он отмечает, что системы, результаты которых легко интерпретировать, используются значительно эффективнее, чем сложные системы, стремящиеся учитывать все параметры одновременно.

Упрощение отчётности о водопользовании

Во многих регионах требования к отчётности по водопользованию становятся всё более комплексными и детализированными. Интеграция данных, получаемых с датчиков дождевальных установок кругового действия, с показателями влажности почвы и прогнозами погоды способствует более эффективному соблюдению нормативных требований к отчётности со стороны сельскохозяйственных производителей.

Уэс Дайер отмечает, что расходомеры и телеметрические системы обеспечивают возможность точного учёта водопотребления. По его словам, фермеры могут экспортировать задокументированные данные, отражающие временные периоды проведения орошения, объём использованной воды и продолжительность её подачи.

Подчеркивается, что это способствует упрощению соблюдения нормативных требований и повышает прозрачность в условиях постоянного развития законодательства в сфере водопользования. В частности, отмечается, что в штате Небраска сельскохозяйственные производители обязаны вести учёт и предоставлять отчётность о водопотреблении в Службу охраны природных ресурсов (NRCS). Указывается, что данные о водопотреблении могут собираться и передаваться вручную, однако использование датчиков, в том числе расходомеров, позволяет значительно оптимизировать данный процесс.

По мере укрупнения фермерских хозяйств ручной сбор данных становится всё более затруднительным, в связи с чем возрастает значимость телеметрических систем. Джош Мозье указывает, что при подключении системы телеметрии к расходомерам вся необходимая информация автоматически регистрируется, что облегчает доступ к данным и их последующую передачу в соответствующие регулирующие органы.

Также подчеркивается, что показатели эффективности оросительных систем могут способствовать участию сельскохозяйственных производителей в программах совместного финансирования, включая Программу стимулирования улучшения качества окружающей среды (EQIP), реализу-

емую Службой охраны природных ресурсов (NRCS). Указывается, что в рамках таких программ зачастую предусматривается софинансирование в размере до 75 % и более, направленное на стимулирование внедрения мер по сохранению водных ресурсов.

Бим отмечает, что определённые данные, получаемые с датчиков, необходимы для выполнения минимальных требований подобных программ, включая EQIP. При этом он подчеркивает, что в каждой административной единице действуют собственные рекомендации и требования, поэтому важно взаимодействовать с местными подразделениями соответствующих органов.

Техническое обслуживание комплектов дождевальных установок кругового действия для достижения оптимальных результатов

Технологический прогресс в сельском хозяйстве развивается высокими темпами и открывает значительные возможности для повышения эффективности. Однако подчеркивается, что для корректного использования доступных данных необходимо понимание базовых принципов эффективности орошения. В первую очередь указывается на необходимость различать такие понятия, как равномерность и эффективность распределения воды.

Под равномерностью понимается степень равномерного распределения воды дождевальными установками кругового действия по полю, тогда как эффективность характеризует долю воды, фактически используемой растениями, в сравнении с потерями вследствие испарения, глубокой инфильтрации или поверхностного стока.

Джош Мозье отмечает, что в профессиональной практике значительное внимание уделяется планированию, однако, по его словам, ключевым аспектом является учет данных мониторинга влажности почвы при составлении планов орошения, в то время как вопросы эффективности подачи воды и равномерности её распределения нередко остаются на второстепенном уровне.

Подобный подход может оказывать непосредственное влияние на экономическую эффективность сельскохозяйственного производства. Указывается, что по результатам недавних полевых испытаний компания *Mosier* установила, что неравномерное распределение воды при работе дождевальных установок может приводить к значительным экономическим потерям.

Мозье также отмечает, что в ряде случаев из-за недостаточной равномерности работы комплектов дождевальных установок кругового дей-

ствия фермерские хозяйства несут убытки, измеряемые тысячами долларов.

Даже в Небраске, которая считается одним из центров ирригационного земледелия, Дж. Бим отмечает, что многие участники сельскохозяйственного сектора до сих пор не в полной мере различают такие понятия, как «равномерность» и «эффективность». Он подчеркивает, что понимание данных терминов и контроль водопотребления имеют ключевое значение, поскольку даже изменение показателей на 1 % может оказывать существенное влияние на общий результат.

В 2024 г. эксперты в Небраске оценили, что сельскохозяйственные производители штата используют около 7 дюймов воды, что соответствует приблизительно 178 мм водного слоя. В пересчёте на общий объём это составляет около 1,7 трлн галлонов воды в год, что эквивалентно примерно 6,4 млрд м³.

Указывается, что снижение водопотребления или повышение эффективности управления всего на 1 % позволило бы ежегодно экономить около 1,7 млрд галлонов воды, что соответствует примерно 6,4 млн м³..

Бим отмечает, что подобные расчеты справедливы только для одного штата, подчеркивая тем самым значимость мониторинга водопотребления и указывая, что даже отклонение в 1 % может иметь существенные последствия.

Одной из причин неравномерности орошения является недостаточное внимание к шарнирным соединениям дождевальных установок, которые, как правило, обслуживаются реже, чем другое оборудование. Джош Мозье указывает, что данный элемент системы часто не проходит регулярного технического обслуживания, включая ежегодные проверки в мастерских. Он подчеркивает, что комплектующие дождевальных установок кругового действия нередко остаются без должного внимания при техническом обслуживании, несмотря на то, что именно они играют ключевую роль в обеспечении качественного и равномерного полива.

Итог

Современные системы кругового орошения достигли такого уровня развития, при котором сельскохозяйственные производители могут осуществлять мониторинг не только объёмов подаваемой воды, но и эффективности её использования. Расходомеры, датчики давления, датчики влажности почвы и телеметрические системы в совокупности обеспечивают формирование комплексной картины функционирования оросительных систем.

При грамотной интеграции указанных технологий и надлежащем техническом обслуживании они позволяют сельскохозяйственным производителям принимать обоснованные, основанные на данных решения, направленные на максимально эффективное использование каждого литра подаваемой воды.

Безупречная точность¹²

Майк Заваки

На протяжении десятилетий капельное орошение являлось основой развития точного земледелия, помогая сельскохозяйственным производителям достигать высокой эффективности и стабильности на больших площадях. Сегодня достижения в области автоматизации, сенсорных технологий и систем управления расширяют инструментарий точного орошения, вновь привлекая внимание к модернизированным системам чекового орошения. Когда-то считавшееся трудоёмким методом, полив затоплением чеков сегодня трансформировалось в гибкий, технологически управляемый подход. Он всё чаще используется крупными производителями специализированных культур, стремящимися оптимизировать производственные процессы, одновременно решая проблемы нехватки рабочей силы, рационального использования водных ресурсов и обеспечения равномерного распределения влаги.

Выращивание специализированных культур, таких как виноградники и фруктовые сады, чрезвычайно чувствительно к дефициту влаги. Например, даже незначительный избыток воды при выращивании винограда может привести к снижению показателя Брикса (содержания сахаров) и ухудшению качества урожая, тогда как недостаточный полив в период формирования скорлупы у миндаля может полностью уничтожить урожай в текущем сезоне.

В традиционных системах полива затоплением чеков, эти риски частично компенсировались за счёт разделения хозяйства на управляемые зоны, каждая из которых оснащалась отдельными клапанами для независимого управления подачей воды через дождевальные или микро-дождевальные системы. Исторически такие блочные (чековые) зоны оставались технологически «неинтеллектуальными»: они функционировали по

¹² Источник: Mike Zawacki. Precision perfected / <https://irrigationtoday.org/features/precision-perfected/>
Опубликовано 22.04.2026

принципу «установил и забыл» либо управлялись вручную, что требовало значительных трудозатрат и практически не обеспечивало фермерам обратной связи.

В отличие от традиционных подходов, современные системы автоматизированного чекового орошения с технологической точки зрения ушли далеко вперед. Они в значительной степени основаны на концепции орошения с переменной интенсивностью, которая предполагает использование более мелких зон управления, принятие решений в режиме реального времени на основе данных, поддержание равномерного состояния растений, а также применение высокотехнологичной инфраструктуры, включающей интеллектуальные клапаны, GPS-картографирование, спутниковые снимки, облачные сервисы, удалённое управление датчиками и, в отдельных случаях, алгоритмы искусственного интеллекта. Таким образом, вместо универсального подхода распределение воды определяется данными.

Стил Роддик, старший менеджер по цифровому маркетингу в компании *Limo*, расположенной в Санта-Розе, Калифорния и специализирующейся на технологиях точного орошения, отмечает, что переход к точечному орошению представляет собой важнейший этап эволюции, выходящий за рамки простой подачи воды.

Он также подчеркивает, что благодаря автоматизации управления на уровне отдельных участков сельхозпроизводители специализированных культур могут соблюдать строгие требования к состоянию растений без необходимости постоянного физического вмешательства, характерного для традиционных систем. Кроме того, Роддик указывает, что повышение эффективности использования водных ресурсов сегодня уже не является исключительно вопросом рационального природопользования, а становится необходимой стратегией обеспечения долгосрочной устойчивости производства.

Управление водными ресурсами

Джованни Пиччини, директор Техасского института водных ресурсов и профессор кафедры почвоведения и растениеводства Техасского университета A&M, отмечает, что современные системы чекового орошения представляют собой безусловное будущее устойчивого сельского хозяйства.

Он подчеркивает, что благодаря развитию технологий дистанционного зондирования сегодня открываются широкие возможности для организации действительно точного орошения по отдельным участкам или с

переменной интенсивностью. По его словам, использование спутниковых снимков, беспилотных летательных аппаратов и других технологий позволяет получать данные в режиме реального времени. Пиччини также указывает, что эти технологии дают возможность наглядно оценивать высокую неоднородность условий в пределах одного поля. В этой связи он отмечает, что адаптивное орошение с учетом пространственной изменчивости сельскохозяйственных культур позволяет оптимизировать использование водных ресурсов и обеспечивает подачу именно того объема воды, который необходим для достижения максимальной урожайности.

Хотя современные подходы к орошению затоплением могут технически применяться в различных системах — включая поверхностное орошение, дождевание, круговые оросительные установки и капельное орошение, — Пиччини подчеркивает, что их ключевая ценность заключается в высокой эффективности и способности адаптироваться к конкретным потребностям сельскохозяйственных культур. Это особенно актуально для таких регионов, как штат Техас, где выраженный гидрологический контраст вдоль межштатной автомагистрали I-35 разделяет засушливые западные районы и более влажные восточные территории. В условиях уско-ряющегося истощения подземных водоносных горизонтов он отмечает, что переход к высокоэффективным системам чекового (блочного) орошения становится одной из ключевых стратегий сохранения водных ресурсов и совершенствования современного управления водопользованием.

Пиччини отмечает, что сельскохозяйственные участки редко бывают однородными. Напротив, они состоят из почв с различным составом, которые по-разному удерживают и отдают влагу. По его словам, если рассматривать поле как единое целое и осуществлять равномерный полив слоем воды в один дюйм, это неизбежно приводит как к перерасходу воды, так и к стрессу у сельскохозяйственных культур.

Он также подчеркивает, что при разделении поля на отдельные участки фермеры получают возможность адаптировать режим орошения с учетом фактической влагоемкости почвы и реальных потребностей растений. Такой целенаправленный подход, по его мнению, обеспечивает более точное соответствие подачи воды потребностям культур, позволяя максимизировать урожайность при одновременном снижении воздействия на окружающую среду.

Решение по вопросам труда

Современные системы автоматизированного чекового орошения существенно меняют структуру трудозатрат при выращивании специализи-

рованных культур, устраняя необходимость в повторяющихся ручных операциях, традиционно связанных с управлением водными ресурсами.

Роман Козак, технический директор и соучредитель компании *Verdi*, специализирующейся на технологиях точного орошения и базирующейся в Ванкувере, объясняет, что традиционные системы орошения по своей сути ограничены возможностями инфраструктуры. Поскольку на большинстве ферм отсутствует достаточная мощность насосного оборудования для одновременного орошения всей площади, хозяйства вынуждены разделять уголья на отдельные зоны.

Без автоматизации данный процесс требует присутствия обслуживающего персонала на объекте более 10 часов в день, при этом необходимо вручную включать и выключать клапаны каждые несколько часов. По его словам, внедрение автоматизированной системы позволяет полностью отказаться от постоянного контроля на месте. Такая технология самостоятельно управляет сложным графиком работы насосов и клапанов в различных зонах, что дает возможность перераспределить трудовые ресурсы на выполнение других важных задач.

Козак отмечает, что экономия трудозатрат обеспечивает практически мгновенную отдачу от инвестиций. По его словам, уже в день установки системы значительно сокращается время, затрачиваемое на включение и выключение оборудования, а также на проверку утечек и возможных неисправностей.

Он также приводит пример виноградника сорта мерло, где стандартный участок требует орошения один-два раза в неделю, при этом одна бригада может обслуживать от 20 до нескольких сотен таких участков. Согласно его оценке, современные системы орошения позволяют экономить до 1 часа 20 минут на каждом цикле полива одного виноградного участка.

Козак подчеркивает, что в результате фермерские хозяйства становятся значительно более продуктивными, поскольку сотрудники могут сосредоточиться на более сложных и важных задачах. По его словам, если ранее на работах по орошению было задействовано около десяти человек, то в новых условиях их число может сократиться до пяти. При этом он отмечает, что оставшиеся сотрудники переходят на более квалифицированные позиции, предполагающие выполнение задач, выходящих за рамки простого управления клапанами.

Кроме того, современные системы чекового орошения помогают решать проблему усиливающегося дефицита рабочей силы в секторе выращивания специализированных культур. Роддик указывает на надвигающиеся демографические изменения, отмечая, что средний возраст работников, обслуживающих ирригационные системы, в настоящее время составляет около 55 лет. По мере приближения этой опытной рабочей силы к пенси-

онному возрасту отрасль сталкивается с трудностями в привлечении более молодого поколения для заполнения этих ключевых должностей. Он также подчеркивает, что дефицит человеческого капитала, усугубляемый ростом затрат на воду и энергию, а также экономическим давлением в секторе специализированного сельского хозяйства, становится катализатором острой необходимости внедрения более автономных и эффективных систем управления орошением.

Качество и количество

По мере того, как современное бороздовое орошение (полив по бороздам) получает всё более широкое распространение, сельскохозяйственные производители всё активнее внедряют автоматические клапаны и датчики, позволяющие осуществлять удалённый мониторинг и планирование полива. По словам Р. Троя Петерса, директора Центра точных и автоматизированных сельскохозяйственных систем Вашингтонского государственного университета, данный сдвиг обусловлен необходимостью более точного контроля сроков и объёмов орошения — факторов, напрямую влияющих на качество урожая и уровень продуктивности.

Ранние версии подобных технологий были чрезмерно дорогостоящими — стоимость отдельных узлов могла достигать 1800 долларов. Однако появление технологии LoRaWAN (сетей дальнего радиуса действия с низким энергопотреблением) существенно изменило ситуацию на рынке. Это решение использует один шлюз с сотовым модемом для подключения множества полевых датчиков и клапанов, при этом стоимость оборудования снизилась до уровня нескольких сотен долларов за единицу, что сделало точную автоматизацию значительно более доступной для сельхозпроизводителей.

Петерс объясняет, что автоматизированные системы позволяют точно настраивать время полива с учётом конкретных потребностей сельскохозяйственных культур. Он отмечает, что данная возможность особенно важна для импульсного орошения — метода, при котором вода подаётся короткими циклами с перерывами, что позволяет сохранять или даже снижать общий расход воды.

По его словам, накапливается всё больше данных, подтверждающих, что импульсное орошение способствует повышению урожайности и улучшению качества продукции. Он подчёркивает, что такой подход можно реализовать, используя столько же или даже меньше воды, однако вручную это практически невозможно, поэтому процесс должен быть автоматизирован.

Роддик, в свою очередь, отмечает, что внедрение автоматизации и высокотехнологичных систем мониторинга в современные системы автоматизированного чекового (блочного) орошения приводит к пересмотру подходов к управлению поливом в виноградниках и фруктовых садах. По его словам, сельскохозяйственные производители получают возможность адаптировать подачу влаги с учётом конкретных почвенно-геологических и топографических особенностей, что обеспечивает более высокую равномерность распределения воды.

Роддик отмечает, что на территории одного виноградника или фруктового сада может встречаться до нескольких различных типов почв, и дифференцированный подход к орошению таких участков позволяет добиться значительно лучших результатов.

В качестве примера он приводит садоводческие хозяйства штата Вашингтон, где производители яблок, груш и вишни получают ощутимые преимущества от применения данного подхода, поскольку он позволяет учитывать уязвимости, характерные для отдельных сортов. В частности, яблоки сорта «Ханикрисп» требуют специальных стратегий орошения для предотвращения физиологических нарушений и повреждений плодов. Помимо обеспечения влагой, такие системы позволяют регулировать температуру кроны, что особенно важно для предотвращения солнечных ожогов и поверхностных повреждений плодов в периоды экстремальной жары.

Кроме того, данная технология применима к широкому спектру специализированных культур, включая голубику, клубнику и авокадо. Роддик подчеркивает, что, несмотря на существенные различия в стратегиях орошения и показателях водосбережения для ягодных культур и, например, плантаций авокадо, ключевые проблемы, связанные с ручным управлением водными ресурсами, остаются универсальными. Разделение посадок на отдельные блоки (зоны) с учётом сортовых особенностей и чувствительности к условиям окружающей среды позволяет отказаться от унифицированного подхода к поливу и перейти к более детализированной системе управления, при которой каждый участок хозяйства рассматривается как самостоятельная производственная единица.

Доверие и признание

При внедрении современных технологий орошения, включая системы автоматизированного чекового орошения, одним из ключевых барьеров остаётся фактор доверия и готовности к их принятию. Эксперты в области орошения отмечают, что данная проблема особенно актуальна для фермеров, привыкших к ручному управлению, которым бывает сложно полагать-

ся на высокотехнологичные решения и связывать с ними долгосрочные производственные результаты. При недостаточном уровне доверия к системе её потенциал остаётся нереализованным, что существенно снижает эффективность вложенных инвестиций.

Козак подчёркивает, что формирование доверия к системам автономного орошения требует прозрачного подхода к управлению рисками и обеспечения наглядности работы технологий. По его словам, стратегия внедрения таких решений должна включать элементы аппаратного резервирования, в частности использование резервных систем управления, функционирующих параллельно с основным насосным оборудованием, что позволяет минимизировать риск повреждений.

Козак также выступает за стратегию поэтапного внедрения, которая позволяет фермерам постепенно адаптироваться к новым технологиям. Он отмечает, что начало с простых автоматизированных задач с низким уровнем риска помогает операторам сформировать уверенность в системе, прежде чем переходить к более сложным конфигурациям. По его словам, система поддерживает такой подход благодаря наличию различных режимов работы — от базового с ручным управлением для пользователей, предпочитающих более высокий уровень контроля, до полностью автономного режима для более опытных операторов. Это позволяет каждому хозяйству индивидуально выстраивать процесс перехода к автоматизации с учётом собственной толерантности к риску и особенностей управления.

Фактор доверия имеет принципиальное значение, поскольку подобные системы напрямую влияют на средства к существованию фермеров. В этой связи он отмечает, что пользователи должны быть уверены в надёжности технологии и в том, что её применение не приведёт к повреждению урожая, от которого зависит экономическая устойчивость хозяйства.

Ученые призывают учитывать в разработке сельскохозяйственных приложений с ИИ особенности стран, где эти технологии будут применяться¹³

В глобальном масштабе сельское хозяйство сталкивается с растущим давлением. Это вызвано изменением климата, деградацией земель, нехваткой рабочей силы, сбоями в цепочках поставок и растущим спросом на продовольствие со стороны населения.

«В то же время, производительность сельхозкультур неравномерна. Например, урожайность кукурузы в США часто превышает 10 тонн с гектара. Такая высокая урожайность обусловлена механизацией, улучшенными сортами семян, ирригацией и эффективным использованием ресурсов, чему все больше способствуют технологии точного земледелия. В отличие от этого, урожайность во многих регионах Африки к югу от Сахары остается на уровне около 2–3 тонн с гектара. Это отражает такие ограничения, как ограниченный доступ к ресурсам, зависимость от богарного земледелия, а также слабая инфраструктура и институциональная поддержка», пишут исследователи Абиодун Олусола Омотайо и Абиб Бабатунде Омотосо в статье, опубликованной журналом *The Conversation*.

Мелкие фермеры составляют около 80% фермерского населения развивающихся стран. Они часто сталкиваются с низкими урожаями из-за ограниченного доступа к основным сельскохозяйственным ресурсам, таким как улучшенные семена, удобрения и агрохимикаты (пестициды). Они реже используют орошение и механизацию сельского хозяйства. Кроме того, они очень уязвимы к климатическим потрясениям.

Традиционные методы ведения сельского хозяйства, включая зависимость от дождевых осадков, использование низкоурожайных местных сортов семян, неоптимальное применение удобрений и сильную зависимость от ручного труда, оказываются недостаточными для удовлетворения потребностей продовольственных систем XXI века.

В последние годы использование инструментов искусственного интеллекта (ИИ) продемонстрировало способность повышать эффективность затрат и результатов, а также обеспечивать мониторинг состояния растений и животных в режиме реального времени. Было показано, что аграрное ПО способствует сохранению почвенных и водных ресурсов, а также снижению послеуборочных потерь, особенно в технологически развитых сельскохозяйственных системах США, Китая и Европы.

¹³ Источник: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/fakty-mnenija-kommentarii/agrarnyi-ii-mozhet-usugubit-neravenstvo-mezhdu-razvitymi-i-razvivayuschimisja-stranami.html> Опубликовано 4.06.2026

«Мы более 15 лет занимаемся научными исследованиями в области прикладной экономики, развития, экономики ресурсов и сельскохозяйственной экономики, включая внедрение технологий и устойчивые сельскохозяйственные системы. В нашем недавнем исследовании мы сравнили внедрение ИИ в сельском хозяйстве в развитых и развивающихся странах. Мы изучили, как искусственный интеллект используется и применяется в разных регионах. Были проанализированы данные из технологически развитых экономик, таких как Европа, США, Австралия и Япония, а также исследования из Африки, Южной Азии, Латинской Америки и других регионов с низким и средним уровнем дохода. Наш главный вывод заключается в том, что ИИ обладает значительным потенциалом для повышения производительности и устойчивости сельского хозяйства. Однако этот потенциал зависит от благоприятной политики, надежной инфраструктуры и равноправного доступа. Без этого технология может скорее усугубить существующее неравенство, чем уменьшить его», отмечают авторы работы.

В ходе исследования были рассмотрены следующие вопросы:

- Модели внедрения ИИ: масштабы его использования в разных регионах и типы приложений ИИ, применяемых в сельском хозяйстве (такие как точное земледелие, обнаружение болезней, прогнозирование урожайности и интеллектуальное орошение).
- Уровни готовности инфраструктуры: наличие электроэнергии, широкополосного доступа в интернет, поддержка цифровой грамотности, системы управления данными, интеллектуальные устройства, услуги по расширению или технической поддержке, необходимые для эффективного внедрения ИИ.
- Ключевые проблемы, связанные с этикой и управлением данными, которые включают в себя: право собственности на данные, конфиденциальность и безопасность, информированное согласие, алгоритмическую предвзятость, прозрачность, подотчетность и равный доступ к сельскохозяйственным технологиям на основе ИИ.
- Как национальная политика реагирует на возникающие риски. К этому относятся: нарушение конфиденциальности данных, уязвимость в сфере кибербезопасности, перемещение рабочей силы, неравный доступ к сельскохозяйственным технологиям с использованием искусственного интеллекта.

Такой подход позволил учесть как глобальные тенденции, так и региональные особенности. Исследователи пришли к выводу, что искусственный интеллект активно влияет на сельское хозяйство в развитых странах. Такие технологии, как инструменты точного земледелия, помога-

ют улучшить использование удобрений, орошение, прогнозирование урожайности и борьбу с вредителями, а также способствуют более эффективному использованию ресурсов и повышению устойчивости к изменчивости климата.

К факторам, которые сделали это возможным, относятся:

- Цифровая инфраструктура. Во многих развитых странах надежный интернет, спутниковые системы, облачные платформы и подключенные датчики обеспечивают непрерывный сбор и анализ данных. Это способствует принятию решений в сельском хозяйстве в режиме реального времени и бесперебойному использованию технологий точного земледелия.
- Сильная институциональная поддержка. Это позволило быстро внедрять инновации в сельском хозяйстве. Поддержка включает в себя создание устоявшихся механизмов управления, обеспечивающих оперативную ясность в вопросах конфиденциальности данных, прозрачности и подотчетности. Это способствовало более ответственному внедрению технологических инноваций.
- Надежное электроснабжение. Это крайне важно для сельского хозяйства, использующего искусственный интеллект. Оно обеспечивает непрерывную работу цифровых систем и технологий, таких как датчики, автоматизированные системы орошения, дроны и платформы обработки данных.

С другой стороны, внедрение ИИ остается ограниченным в развивающихся странах, где производство продуктов питания в основном сосредоточено на мелких фермерах. К ограничивающим факторам относятся:

- Цифровое неравенство. Самый большой барьер. Фермерам часто не хватает стабильного интернет-соединения, доступных по цене устройств или достаточной цифровой грамотности.
- Электроэнергия. Дефицит электроэнергии препятствует внедрению и эффективному использованию ИИ в сельском хозяйстве, нарушая работу цифровых инструментов и инфраструктуры, необходимых для сбора, обработки и передачи данных.
- Стоимость. Высокая стоимость инструментов ИИ и недостаточная цифровая грамотность для эффективного использования этих инструментов.
- Ограниченный доступ к кредитам. Из-за недостатка финансовых возможностей фермерам сложно инвестировать в цифровые технологии. Они не могут позволить себе первоначальные затраты на покуп-

ку, установку, а также текущее техническое обслуживание и абонентскую плату, необходимые для эффективного использования инструментов искусственного интеллекта.

Ученые также выявили два фактора, которые препятствуют внедрению ИИ в Африке и других развивающихся странах.

Во-первых, многие модели аграрного ИИ плохо подходят для условий развивающихся стран. Инструменты, обученные на данных из индустриальных сельскохозяйственных систем, часто показывают низкую эффективность в местных условиях. Это приводит к предвзятым или неточным рекомендациям и повышает риски для уязвимых фермеров.

Например, модель прогнозирования урожайности или обнаружения вредителей на основе ИИ, обученная на крупных монокультурных фермах в США или Нидерландах, может выдавать ненадежные рекомендации при применении к мелким фермерским хозяйствам в Африке, характеризующимся смешанным земледелием, нерегулярным использованием ресурсов, богатым земледелием и крайне неоднородными почвенными условиями.

Во-вторых, существуют этические проблемы, связанные с использованием ИИ, в частности, отсутствие ясности в вопросах владения данными и конфиденциальности. Слабое управление данными наиболее выражено в развивающихся регионах. Фермеры часто практически не контролируют то, как собираются, используются или монетизируются их данные.

Эти проблемы распределены неравномерно. Однако риски более выражены в регионах с низким уровнем дохода, где системы регулирования слабее, а у мелких фермеров меньше ресурсов для управления технологическими изменениями.

«Без надлежащих мер ИИ может усугубить неравенство, уже существующее в глобальных продовольственных системах. Он также рискует углубить существующее неравенство, ограничивая свой вклад в устойчивое развитие и продовольственную безопасность. Искусственный интеллект может преобразовать сельское хозяйство в Африке и других развивающихся странах, но без правильной политики он может, наоборот, усугубить неравенство», подчеркивают авторы работы.

По их словам, приоритетной задачей является укрепление основ. Надежное электроснабжение, доступ в интернет и доступные цифровые инструменты имеют решающее значение. Без них искусственный интеллект останется недоступным для большинства мелких фермеров. Доступ к финансированию, обучению и местным системам данных также будет критически важен.

Внедрение должно быть постепенным, начиная с простых инструментов, таких как продвинутые мобильные консультационные услуги, прежде чем переходить к более масштабным решениям. Искусственный интеллект должен быть инклюзивным и ориентированным на фермеров. При правильном применении он может укрепить продовольственные системы. При неправильном применении он рискует еще больше отбросить наиболее уязвимые слои населения назад.

Автономный сельхозробот находит сорняки и камни¹⁴

В отличие от разновидностей техники, используемой на полях лишь периодически, разработчики создали агробота для постоянного нахождения в поле на протяжении всего вегетационного периода. Его задача - непрерывно собирать данные, чтобы предоставлять фермерам подробную информацию о состоянии урожая и указывать, где собирать камни.

В 2027 году точное земледелие в Канаде сделает еще один шаг вперед с появлением на рынке автономного робота TerraScout, разработанного американской компанией TerraClear. Эта машина сочетает в себе искусственный интеллект, GPS и сверхвысокое разрешение для анализа полей в мельчайших деталях, пишет Джефф Мельхиор в статье канадского агропортала The Western Producer.

Система TerraScout, уже доступная в США, специально разработана для крупных сельскохозяйственных предприятий. По словам Девина Ламмерса, президента и генерального директора TerraClear, эта технология может изменить подход фермеров к мониторингу и управлению своими полями.

Благодаря камерам и встроенным аналитическим системам робот может обнаруживать сорняки, оценивать всхожесть культур, измерять плотность растений и даже находить камни при необходимости. Собранные данные затем преобразуются в карты и рекомендации по борьбе с сорняками или загрязнением поля камнями. Например, фермер может использовать эти данные для разработки целенаправленного плана опрыскивания или для выявления участков, требующих особого внимания. Физический сбор камней выполняет специальное навесное оборудование — TerraClear Rock Picker. Это мощный механический ковш-захват, который крепится на

¹⁴ Источник: <https://www.agroxxi.ru/selhoztehnika/novosti/avtonomnyi-selhozrobot-nahodit-sornjaki-i-kamni-rabotaet-kruglosutochno.html> Опубликовано 5.06.2026

обычный трактор или погрузчик и точно собирает камни по карте, избавляя водителя от необходимости искать их вслепую.

По данным TerraClear, цель состоит в том, чтобы помочь фермерам принимать обоснованные решения, основываясь на высокоточных наблюдениях, а не на крупномасштабных оценках.

Робот TerraScout работает с пространственным разрешением (GSD) 1 мм, генерируя более 10 миллиардов точек данных на гектар. На практике это означает, что каждый пиксель изображения представляет собой всего один миллиметр рельефа. Чем меньше это значение, тем детальнее изображение. Благодаря такой исключительной точности робот может наблюдать детали, которые остались бы незамеченными при использовании традиционных методов картографирования с помощью дронов или спутников.

Эта технология позволяет агроботу собирать приблизительно десять миллиардов изображений с каждого гектара. Такое количество данных открывает возможности для гораздо более детального понимания того, что происходит в каждой части поля.

Сельскохозяйственный робот для мониторинга поля имеет ширину 2,4 метра и может быстро охватывать очень большие территории.

Среди его основных возможностей:

- Ежедневное картографирование более 400 гектаров.
- 8 камер высокого разрешения.
- Двигается со скоростью до 24 км/ч.
- Осматривает полосу шириной 18 метров, двигаясь при этом.
- Автономно работает в течение шести часов между каждой заправкой.
- Работает круглосуточно независимо от погоды.

Возможности робота выходят за рамки мониторинга урожая. Он также может обнаруживать камни размером 20 см и более на полях. После обнаружения этих препятствий система может рассчитать оптимальный маршрут для их удаления.

Существующие модели могут измерять плотность сорняков на разных участках поля. Однако TerraClear планирует пойти еще дальше в будущих версиях. Компания надеется, что в конечном итоге система сможет распознавать присутствующие виды сорняков и определять стадию их развития.

Робот также может оценивать качество всхожести урожая. Он подсчитывает растения и измеряет равномерность появления всходов. Эти данные позволяют фермерам быстро выявлять проблемные участки, будь то недостаточная всхожесть, проблемы с посевом или стресс, испытываемый молодыми растениями.

В конечном итоге, искусственный интеллект может выявлять взаимосвязи между наблюдаемыми условиями на поле и будущими результатами выращивания урожая.

По словам Девина Ламмерса, накопление данных с очень высоким разрешением может позволить обнаружить явления, которые в настоящее время невидимы невооруженному глазу.

Объём данных, генерируемых TerraScout, настолько велик, что отправить их все на удалённые серверы для анализа было бы сложно. Поэтому компания использует так называемую «граничную обработку». Изображения анализируются непосредственно на борту робота с помощью встроенного компьютера.

Как и многие новые сельскохозяйственные технологии, TerraScout вызывает как интерес, так и скептицизм среди производителей. По словам Девина Ламмерса, такая реакция совершенно нормальна. Фермеры часто одними из первых внедряют инновации, если они действительно приносят дополнительную пользу. Однако они также хотят быть уверенными, что эти технологии действительно будут работать в условиях их собственного фермерского хозяйства. Такой осторожный подход в конечном итоге может принести пользу таким решениям, как TerraScout. Если робот оправдает возложенные на него ожидания, он может стать важным новым инструментом в точном земледелии, позволяя производителям лучше понимать свои поля.

Каждому аграрному региону нужен персональный, а не универсальный ИИ¹⁵

Искусственный интеллект коренным образом меняет облик жизни, какой мы её знаем. В сельском хозяйстве мировой рынок ИИ, как ожидается, достигнет стоимости почти 47 миллиардов долларов США к 2034 году. ИИ позволяет получать более высокие урожаи при меньших затратах, что имеет огромное значение в эпоху климатической неопределенности и дефици-

¹⁵ Источник: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/fakty-mnenija-kommentarii/kazhdomu-agrarnomu-regionu-nuzhen-personalny-i-a-ne-universalnyi-ii.html> Опубликовано 10.06.2026

та ресурсов. Однако внедрение аграрного ИИ в практики фермеров зависит от множества факторов, а не только от технологий.

Проблему внедрения аграрного ИИ рассматривает Чарльз Контех — канадский политолог, профессор государственной политики и управления на факультете политических наук в Университете Брока, который также является директором исследовательской сети Niagara Community Observatory. Его статья была опубликована в журнале The Conversation.

В Канаде политики в сфере сельского хозяйства и лидеры отрасли постепенно начинают осознавать потенциал искусственного интеллекта, что признается в новой стратегии Канады «Искусственный интеллект для всех». Но одних только технологий недостаточно для достижения столь желаемых преобразований, пока существует «пробел внедрения».

«Канада отстает от других стран Большой Семерки G7 в системной трансформации сельскохозяйственного сектора. Проблема заключается не в отсутствии современных инструментов, а в отсутствии систем, которые помогают фермерам понимать, интегрировать и доверять этим технологиям. Я руководил научной группой в Университете Брока, проводившей двухлетнее исследование автоматизации и робототехники в сельском хозяйстве Онтарио. Мы обнаружили, что, хотя многие технологии были технически обоснованными и коммерчески доступными, их внедрение ограничивалось более широкими структурными факторами. Наши выводы применимы к сельскохозяйственным технологиям с использованием ИИ по всей Канаде», пишет Чарльз Контех.

Что уже предоставляет аграрный ИИ фермерам

В сельском хозяйстве такие инструменты, как Farmer Chat, AgPal и Root AI, меняют жизнь фермеров по всему миру, предоставляя им основанные на данных рекомендации в режиме реального времени.

Интеллектуальные датчики отслеживают влажность почвы, уровень питательных веществ и pH. Дроны и спутники получают полевые снимки высокого разрешения. Системы искусственного интеллекта обрабатывают эти данные, чтобы определить, где культуры испытывают стресс, и за миллисекунды определяют, какие меры необходимы, иногда с точностью до нескольких квадратных метров.

Раннее обнаружение болезней и вредителей на основе искусственного интеллекта позволяет производителям вмешиваться до того, как проблемы станут очевидными. Системы компьютерного зрения могут выявлять такие заболевания, как желтая ржавчина или фитофтороз, на несколько дней или недель раньше, чем при ручном осмотре, что снижает потери

урожая и использование пестицидов. Иригационные платформы, такие как CropX, динамически регулируют подачу воды на основе данных о почве и погоде, иногда сокращая потребление воды до 50%.

Аналогичные тенденции и в животноводстве. Фермеры используют датчики, камеры и модели машинного обучения для мониторинга здоровья животных, выявления хромоты и определения ранних признаков таких заболеваний, как мастит, до того, как вспышки распространятся по стадам.

Почему внедрение постоянно тормозится

Исследование выявило три препятствия на пути внедрения ИИ. Во-первых, многие фермеры по-прежнему не знают, какие инструменты ИИ существуют и какие из них актуальны для их хозяйства. Это синдромом информационного пробела.

Во-вторых, другие испытывают трудности с интеграцией новых систем с существующим оборудованием, платформами данных и рабочими процессами. Это синдромом несоответствия.

Во-третьих, сети инновационной системы часто нескоординированы: университеты, технологические компании, службы распространения знаний и производители работают изолированно, а не сообща. Это синдром фрагментации.

Совокупный эффект этих проблем приводит к ослаблению структур поддержки, что ограничивает возможности для обмена опытом и скоординированного внедрения новых технологий.

Системы важнее инструментов

«Для раскрытия потенциала ИИ и снижения связанных с ним угроз канадская сельскохозяйственная политика должна основываться на том, что моя исследовательская группа называет системным подходом к сельскохозяйственным инновациям. В рамках этой концепции инновации рассматриваются как сетевой процесс, в котором участвуют исследователи, фермеры, агропредприниматели, политики и посреднические организации, которые их связывают», пишет Чарльз Контех.

По его мнению, основным принципом этого подхода является важность регионального контекста в такой обширной по территории стране, как Канада. То, что работает для интенсивных молочных систем в Квебеке, может не подойти производителям зерна в Саскачеване или садоводческим

хозяйствам в Британской Колумбии и Онтарио. Географические масштабы Канады и разнообразие производства означают, что благие намерения в отношении национальных решений часто оказываются недостаточными. Он объясняет ключевые элементы инновационных систем как архитектуру управления. В этом контексте ИИ может служить мощным инструментом преобразования для повышения производительности и экологической ответственности в сельском хозяйстве.

При надлежащем управлении в рамках выверенной, регионально ориентированной инновационной экосистемы ИИ может способствовать обмену знаниями, улучшению взаимодействия между разработчиками технологий и конечными пользователями.

При неправильном применении ИИ может усиливать дезинформацию и воспроизводить предвзятость, заложенную в обучающих данных. Он может сужать, а не расширять возможности фермеров по принятию решений, подрывать конфиденциальность и право собственности на данные и в конечном итоге разрушать доверие к инструментам на основе ИИ.

Переход от обещаний к практике

Для превращения потенциала ИИ в устойчивые перемены необходимы фундаментальные системные изменения, направленные на более скоординированные действия. Учитывая обширную территорию Канады, политика должна также укреплять региональные инновационные системы, а не полагаться на универсальные программы.

«Межправительственные усилия — подход, который я называю многоуровневым управлением, — основанные на региональных экосистемах поддержки инноваций, могут восполнить пробелы в знаниях посредством программ обучения фермеров, которые сосредоточены на интеграции и использовании, а не просто на продвижении технологий. Искусственный интеллект сам по себе не сможет трансформировать канадское сельское хозяйство. Однако, будучи интегрированным в эффективную архитектуру управления инновационными системами, он может внести радикальный вклад в создание более конкурентоспособной, устойчивой и жизнеспособной агропродовольственной системы», заключает Чарльз Контех.

Компания «Global Aerospace» сравнила применение дронов и пилотируемой авиации для управления сельскохозяйственными культурами¹⁶

Моррис-Плейнс

Низколетящие самолеты, распыляющие над полями мелкодисперсный аэрозоль, уже давно стали привычной частью сельскохозяйственного ландшафта. Технология авиационной обработки сельскохозяйственных культур, появившаяся в начале XX века и известная как авиационное опрыскивание, со временем стала неотъемлемым элементом современного земледелия. Она позволила фермерам быстро и эффективно обрабатывать большие площади посевов. На протяжении десятилетий самолеты и вертолеты оставались основными средствами для масштабного внесения удобрений, пестицидов и других средств защиты растений. Однако сегодня этот традиционный подход претерпевает значительные изменения благодаря развитию более компактных, маневренных и технологичных решений — сельскохозяйственных дронов. По данным *Global Aerospace*, распространение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) знаменует новый этап в развитии точного земледелия. Понимание различий между сельскохозяйственными дронами и традиционной авиацией имеет ключевое значение, поскольку позволяет оценить их влияние на основные аспекты современного сельского хозяйства — затраты, доступность технологий и экологическую устойчивость.

Дроны и пилотируемая авиация в управлении сельскохозяйственными культурами: сравнение технологий

В основе «революции дронов» лежат технологии точного земледелия, основанные на использовании высокоточного GPS-позиционирования. Сельскохозяйственные дроны оснащаются GPS-навигацией и специализированным программным обеспечением для картографирования, что позволяет им выполнять полеты с высокой точностью. Перед началом работы оператор задает маршрут и определяет конкретные зоны обработки, благо-

¹⁶ Источник: Morris Plains. Global Aerospace Provides Insights on Drones vs. Piloted Aircraft for Crop Management, Comparing the Technology, Case Studies, and Real-World Applications / <https://www.globenewswire.com/news-release/2026/05/28/3303177/0/en/global-aerospace-provides-insights-on-drones-vs-piloted-aircraft-for-crop-management-comparing-the-technology-case-studies-and-real-world-applications.html> Опубликовано 28.05.2026

даря чему дрон может лететь всего в нескольких метрах над посевами, распыляя препараты исключительно там, где это действительно необходимо.

Такой подход позволяет значительно сократить потери химических средств и свести к минимуму их попадание на нецелевые участки, включая водоемы и водотоки. Традиционная сельскохозяйственная авиация, несмотря на способность быстро обрабатывать большие площади, обычно использует более широкую зону распыления, что ограничивает точность обработки.

Еще одним важным преимуществом дронов является их многофункциональность. Помимо опрыскивания сельскохозяйственных культур, они могут оснащаться современными камерами и датчиками для сбора и анализа данных. В частности, мультиспектральные сенсоры позволяют получать информацию, необходимую для построения карт нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), которые наглядно отражают состояние посевов.

На основе этих данных фермеры могут своевременно выявлять признаки стресса растений, обнаруживать очаги распространения вредителей, оценивать состояние почвы и получать комплексное представление о состоянии сельскохозяйственных угодий. В отличие от этого, пилотируемые воздушные суда в большинстве случаев выполняют одну специализированную функцию — внесение агрохимикатов.

Эффективность и охват как ключевые факторы при выборе технологии

Когда речь идет о скорости обработки и охвате больших сельскохозяйственных площадей, традиционная авиация по-прежнему сохраняет свои преимущества. Сельскохозяйственный самолет способен взять на борт сотни галлонов рабочего раствора и обработать значительные площади за один вылет.

Производительность дронов в значительной степени ограничивается временем автономной работы и грузоподъемностью. Продолжительность одного полета обычно составляет от 15 до 45 минут, а объем баков для рабочего раствора существенно меньше, чем у пилотируемых воздушных судов. По этой причине дроны менее эффективны при обработке обширных сельскохозяйственных угодий, где решающее значение имеют длительность полета и возможность перевозки больших объемов препаратов.

Вместе с тем для небольших и средних фермерских хозяйств, а также для полей сложной конфигурации, расположенных на пересеченной мест-

ности или имеющих естественные препятствия, дроны нередко оказываются более практичным решением. Благодаря высокой маневренности они способны выполнять точную обработку участков, недоступных или неудобных для традиционной авиации. Кроме того, дроны проще использовать в условиях ограниченной видимости, а также в засушливую погоду при умеренной скорости ветра — примерно от 5 до 16 км/ч.

Опрыскивание сельскохозяйственных культур с помощью дронов и самолетов: сравнение затрат

Одной из главных причин растущей популярности сельскохозяйственных дронов является более низкий порог первоначальных инвестиций. По сравнению с пилотируемой авиацией использование дронов требует значительно меньших финансовых вложений. Стоимость профессионального комплекса для аграрных работ составляет лишь небольшую часть расходов на приобретение или аренду самолета, которые могут достигать десятков и даже сотен тысяч долларов.

Существенно различаются и эксплуатационные расходы. Дроны работают от аккумуляторных батарей, что исключает затраты на авиационное топливо. Их техническое обслуживание также проще и обходится дешевле. Дополнительным преимуществом является подготовка операторов. Обучение управлению сельскохозяйственными дронами, как правило, занимает значительно меньше времени, чем подготовка пилотов традиционной авиации, что позволяет сократить долгосрочные расходы на персонал.

Сравнение сельскохозяйственных дронов и традиционных самолетов для опрыскивания полей

Несмотря на то, что сельскохозяйственные дроны становятся все более доступными, функциональными и востребованными, каждая из технологий имеет свои преимущества и ограничения.

Фактор	Традиционные самолеты	Сельскохозяйственные дроны
Доступность местности	Ограниченные возможности для взлета и посадки на холмистой или застроенной местности	Высокая точность работы на местности любого типа
Рассеивание химических веществ	Повышенный риск	Возможность снижения
Подготовка пилотов	Широкий охват	Умеренный, но растущий спрос
Стоимость за единицу	1 млн долларов и более	30 000–50 000 долларов

Влияние дронов на окружающую среду и безопасность в контексте устойчивого сельского хозяйства

Еще одним важным преимуществом использования дронов в сельском хозяйстве является их меньшее воздействие на окружающую среду. Высокая точность работы дронов в сочетании с GPS-навигацией позволяет значительно сократить расход химических препаратов за счет предотвращения избыточного распыления и сноса.

Такое целевое внесение обеспечивает обработку только необходимых участков посевов, что позволяет свести к минимуму попадание препаратов в близлежащие экосистемы, сохранить буферные зоны и предотвратить повреждение чувствительных соседних культур. Это способствует повышению экологической безопасности благодаря следующим преимуществам:

- **Снижение риска.** Дистанционное управление значительно уменьшает воздействие потенциально опасных химических веществ на человека.
- **Снижение выбросов.** Дроны с аккумуляторным питанием не создают выбросов в месте эксплуатации и работают значительно тише традиционных летательных аппаратов, снижая уровень шумового загрязнения.
- **Минимальный снос препаратов.** Благодаря полету на небольшой высоте над растительным покровом дроны обеспечивают более точное внесение препаратов, особенно при сложных ветровых условиях.

Нормативно-правовые и практические сложности

Внедрение сельскохозяйственных дронов для управления сельскохозяйственными культурами сопряжено с рядом нормативных и эксплуатационных ограничений. В США операторы обязаны соблюдать требования Федерального управления гражданской авиации (FAA). Это включает получение сертификата дистанционного пилота для коммерческого использования, а также, в ряде случаев, сертификата оператора сельскохозяйственных воздушных судов в соответствии с Частью 137 для проведения работ по распылению химических веществ.

На использование дронов также распространяются ограничения по массе и грузоподъемности, что может ограничивать их применение в более широком масштабе. Кроме того, практические факторы, такие как неблагоприятные погодные условия и сложный рельеф местности, могут влиять на эффективность и безопасность эксплуатации.

Летом 2025 года администрация Трампа издала указ, направленный на расширение возможностей выполнения полетов за пределами прямой видимости (BVLOS) в координации с Федеральным управлением гражданской авиации (FAA). Предлагаемые FAA правила, изложенные в Части 108, которые, как ожидается, вступят в силу в первой половине 2026 года, призваны трансформировать использование дронов в сельском хозяйстве, разрешив полеты BVLOS без необходимости получения индивидуальных разрешений для каждого случая. Этот переход позволит производителям рассматривать разработку более крупных опрыскивающих дронов с увеличенной грузоподъемностью и более длительным временем полета, что делает их более подходящими для обработки обширных сельскохозяйственных угодий.

Одновременное управление несколькими дронами одним сертифицированным оператором может значительно повысить эффективность и снизить затраты на рабочую силу. По мере адаптации отрасли к этим изменениям производители дронов и поставщики услуг, вероятно, будут инвестировать в парки дронов и технологии, готовые к выполнению операций BVLOS, чтобы воспользоваться расширяющимися возможностями в сфере точного земледелия.

Управление сельскохозяйственными культурами с использованием аэрофотосъемки: тематические исследования и практическое применение

В сельскохозяйственной отрасли набирает популярность гибридный подход к управлению посевами с использованием авиационных технологий. Крупные коммерческие фермы по-прежнему активно применяют пилотируемые воздушные суда для обработки обширных полей, где ключевым фактором остается высокая производительность и скорость выполнения работ. В то же время многие хозяйства дополняют эти решения использованием дронов для выполнения специализированных задач.

К таким задачам относится точечное опрыскивание участков, засоренных сорняками, обработка труднодоступных зон вблизи препятствий или линий электропередачи, а также внесение отдельных видов питательных веществ на проблемные участки поля, выявленные на основе данных с датчиков. Это отражает растущее понимание того, что дроны и пилотируемые летательные аппараты как технологические платформы для внесения средств защиты растений не конкурируют, а скорее дополняют друг друга.



Будущее авиационного опрыскивания сельскохозяйственных культур

Инновации в области дроновых технологий развиваются стремительными темпами. Ожидается, что будущие разработки позволят устранить существующие ограничения за счет увеличения срока службы аккумуляторов и повышения грузоподъемности. Перспектива создания полно-

стью автономных парков дронов, управляемых одним оператором, может кардинально изменить подход к управлению фермерским хозяйством.

При интеграции с системами управления сельскохозяйственными угодьями на базе искусственного интеллекта такие дроны смогут не только выполнять обработку полей, но и обеспечивать анализ данных в режиме реального времени. Это открывает возможности для применения методов дифференцированного внесения, при которых дрон автоматически регулирует объем распыления на основе данных о состоянии посевов, обеспечивая, чтобы каждое растение получало необходимое количество средств.

Какой вариант подходит для вашей фермы?

Выбор между опрыскиванием с помощью дронов и традиционной авиацией зависит от конкретных потребностей и масштабов хозяйства.

Пилотируемая авиация по-прежнему остается оптимальным выбором для:

- Крупных коммерческих фермерских хозяйств с обширными однородными полями.
- Задач, где скорость обработки и широкий охват являются приоритетом.
- Применений, требующих быстрого внесения больших объемов рабочего раствора.

Сельскохозяйственные дроны лучше всего подходят для:

- Малых и средних фермерских хозяйств или хозяйств, выращивающих разнообразные культуры.
- Полей нестандартной формы, с препятствиями или труднодоступными участками.
- Точного точечного опрыскивания и целенаправленной обработки.
- Хозяйств, стремящихся сократить использование химических препаратов и снизить воздействие на окружающую среду.

Поскольку современные фермеры привыкли работать с технологически продвинутой наземной сельскохозяйственной техникой, те из них, кто внедряет в свою деятельность дроны и, возможно, заинтересован в страхо-

вой защите, должны досконально понимать и демонстрировать компетентность в следующих областях:

Нормативно-правовая база, разделы правил FAA:

- 107 — Малые беспилотные летательные аппараты (БПЛА).
- 108 — Эксплуатация БПЛА за пределами прямой видимости.
- 137 — Распыление химических веществ и сельскохозяйственных препаратов с помощью БПЛА.

Условия эксплуатации:

- Базовая и периодическая наземная и летная подготовка по работе с конкретным оборудованием БПЛА.

В конечном счете, развитие технологий дронов не означает прекращение традиционных методов авиационного опрыскивания. Напротив, оно знаменует собой переход к более интегрированному, интеллектуальному и продуктивному подходу к ведению сельского хозяйства.

О компании Global Aerospace

Компания *Global Aerospace* обладает столетним опытом и стремится предоставлять решения в области авиационного страхования, направленные на защиту участников отрасли и содействие её развитию. Обладая финансовой устойчивостью, обеспеченной объединением ведущих мировых инвесторов, мы используем инновационные подходы, передовые технологии и синергию многонациональной команды для принятия рисков на страхование и урегулирования убытков по широкому спектру страховых случаев, с которыми сталкиваются наши клиенты.

Штаб-квартира компании расположена в Великобритании, а офисы находятся в Канаде, Франции, Германии и по всей территории Соединённых Штатов.

Климатическая устойчивость сельского хозяйства

Корни риса в центре внимания глобальных исследований климатической устойчивости¹⁷

Глобальная сеть ученых, занимающихся исследованиями в области риса и климатического стресса, объединилась для решения одной из наиболее актуальных задач в сельском хозяйстве — защиты важнейшей продовольственной культуры мира в условиях усиливающегося давления со стороны окружающей среды.

Семинар, который был проведен Международным институтом исследований риса (IRRI) в партнерстве с Ноттингемским университетом, собрал специалистов в таких областях, как биология корней, тепловой стресс, засоленность и генетика. Отмечалось, что данная инициатива, реализуемая при финансовой поддержке гранта «Укрепление» Фонда исследований глобальных вызовов (GCRF), направлена не только на получение научных результатов, но и на объединение различных дисциплин для ускорения поиска решений.

Рис обеспечивает пропитанием более половины населения Земли, однако ученые подчеркивают, что эта культура по-прежнему крайне уязвима к повышению температуры, нестабильному режиму осадков и росту засоленности почв. Они отмечают, что в условиях, когда глобальные температуры превышают порог в 1,5 °C, установленный в Парижском соглашении, междисциплинарное сотрудничество становится столь же важным, как и сама наука.

По словам Ранджана Сварупа, специалиста по молекулярной биологии растений из Ноттингемского университета, эти тенденции свидетельствуют о том, что мир приближается к необратимым точкам невозврата, и даже повышение температуры на 1 °C может привести к снижению урожайности примерно на 6%. Он также отметил, что именно поэтому в настоящее время так остро необходимы культуры, устойчивые к изменению климата, и подчеркнул, что дальнейший прогресс будет зависеть от объединения знаний из разных дисциплин.

¹⁷ Источник: Global Research Network Puts Rice Roots At The Center Of Climate Resilience / https://www.global-agriculture.com/ag-tech-research-news/global-research-network-puts-rice-roots-at-the-center-of-climate-resilience/#google_vignette Опубликовано 4.05.2026

Корни как скрытый фактор климатической устойчивости

Ученые утверждают, что в условиях обострения климатических проблем важно понять, как рис реагирует на стрессовые факторы, рассматривая растение как единую систему — от корней до зерен.

По данным исследовательского проекта под руководством бывшего старшего научного сотрудника IRRI д-ра Амелии Генри, ныне работающей в CIRAD, и руководителя исследовательской группы IRRI д-ра Санкалпа Бхосале, изучалось влияние вариаций в строении корневой системы на засухоустойчивость. Команда выявила сорта риса с разным диаметром корней, которые демонстрировали более высокую продуктивность в стрессовых условиях.

Эти сорта были проверены в ходе полевых испытаний, визуализации корневой системы и климатических моделирований. Передовые методы визуализации позволили получить подробные изображения корней, а исследования экспрессии генов, проведенные в Ноттингемском университете, помогли установить связь между особенностями корневой системы и их генетической основой.

Предварительные результаты показали, что определенные характеристики корневой системы — такие как большее количество кроновых корней, меньший размер центрального ствольного ядра (стели) и меньшее количество крупных водопроводящих сосудов («метаксилемы») — связаны с улучшенным ростом растений и повышенной жизнеспособностью в условиях засухи.

Исследовательская группа отметила, что эти признаки могут ускорить выведение засухоустойчивых сортов риса, хотя проверка их влияния на урожайность продолжается.

Тепловой стресс ставит под угрозу урожай и качество зерна

Повышение температуры становится одной из самых серьезных угроз для производства риса, особенно на этапах цветения и наполнения зерен, когда культура наиболее уязвима.

По информации Эрстелле Пасион-Уй, научного сотрудника Центра качества зерна и питания Международного института риса (IRRI), рис особенно уязвим на ключевых стадиях развития, и даже небольшое повышение температуры может значительно снизить урожайность.

Исследования показывают: повышение ночной температуры на 1 °C может привести к дополнительной потере урожая примерно на 7 %, что зачастую превышает последствия дневного теплового стресса (6 %). Отмечалось, что жара во время цветения может вызывать стерильность колосков (появление пустых зерен), а высокая температура в период наполнения зерна нарушает процесс образования крахмала, приводя к появлению меловых зерен, повышенной ломкости и снижению товарной ценности.

Для решения этой проблемы ученые разрабатывают теплостойкие высокоурожайные сорта риса, применяя передовые селекционные методы в сочетании с инструментами мультиомики, с целью сохранить как урожайность, так и качество зерна в условиях повышения температуры.

Засоленность усиливает воздействие климатических стрессов

Засоленность все в большей степени сказывается на системах рисоводства, особенно в прибрежных и орошаемых регионах, где её воздействию зачастую усугубляется другими факторами экологического стресса.

По информации постдокторанта IRRI Парвиндердипа Калона, хотя сама по себе засоленность сдерживает рост растений, её влияние становится значительно более разрушительным в сочетании с тепловым или засушливым стрессом, что подчеркивает сложность реакций растений в условиях изменения климата.

Исследования показали: световая обработка, проведенная в контролируемых условиях, способствовала снижению накопления токсичных хлоридов в листьях и побегах. Это улучшало рост растений в условиях солевого стресса, открывая потенциальный путь для восстановления полей, пострадавших от засоления.

Ключевые шаги к климатической устойчивости риса

Дополнительные исследования, представленные на семинаре, продемонстрировали масштаб и разнообразие работ, проводимых в различных научных учреждениях. Университет Ноттингема поделился результатами исследований по фотосинтетической и корневой термоустойчивости, а Копенгагенский университет изучал, как корни адаптируются к затопленным почвам. Бангладешский институт рисоводства представил методы машинного обучения, позволяющие установить связь между характеристиками корней и выбросами метана, а исследователи из Филиппинского института рисоводства (DA-Philippine Rice Research Institute) рассказали о достиже-

ниях в повышении устойчивости богарного риса. Также сообщалось, что представители Ханойского университета науки и технологий выступили с докладом о влиянии гормонов на рост корней риса. В мероприятии приняли участие слушатели курса по фенотипированию корней риса, а также другие стипендиаты IRRI.

Эта работа является частью заключительного семинара в рамках проекта GCRF Strengthening Grant «Оценка диаметра корней как ключевого признака стрессоустойчивости», проходящего в штаб-квартире IRRI в Лос-Баньосе.

Защита сельскохозяйственных культур больше не успевает за природой: как сократить этот разрыв?¹⁸

Энтони Клемм

Сфера защиты сельскохозяйственных культур сталкивается с растущими вызовами, связанными с изменением климата, развитием устойчивости у вредителей и ужесточением нормативных требований. Традиционная система научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), в рамках которой вывод новых продуктов на рынок часто занимает более десяти лет, уже не соответствует темпам биологических и технологических изменений. Адаптивные системы НИОКР становятся более эффективным подходом, позволяя повышать результативность использования капитала за счет раннего выявления наиболее перспективных молекул и концентрации ресурсов на разработках с более высокой вероятностью успеха.

Защита сельскохозяйственных культур имеет основополагающее значение для глобальной продовольственной безопасности, однако за пределами аграрного сектора ей по-прежнему уделяется недостаточное внимание. Ежегодно вредители уничтожают, по оценкам, от 20 до 40 % мирового урожая, что приводит к росту цен на продовольствие, нестабильности поставок и экономическим потерям. Эти проблемы усугубляются тем, что

¹⁸ Источник: Anthony Klemm. Crop protection can no longer keep pace with nature. How do we catch up? / <https://www.weforum.org/stories/2026/04/crop-protection-agriculture-innovation/> Опубликовано 28.03.2026

изменение климата ускоряет эволюцию вредителей и усиливает нестабильность условий выращивания.

Острота ситуации дополнительно усиливается ростом мирового спроса на продовольствие, утратой биоразнообразия и повышением требований к устойчивому развитию. По оценкам, только утрата биоразнообразия обходится мировой экономике примерно в 10 трлн долларов в год с учетом последствий для здравоохранения и сельского хозяйства. При этом около трети всего продовольствия, производимого для потребления человеком, теряется или выбрасывается.

На этом фоне инновационный потенциал отрасли испытывает значительное давление. Отказ от устаревших химических соединений привел к усилению зависимости от ограниченного числа высокоэффективных препаратов, что, в свою очередь, ускоряет развитие резистентности у вредителей. Проведение полевых испытаний по-прежнему ограничено сезонными циклами, а климатическая изменчивость дополнительно усложняет процесс разработки. Одновременно глобальные нормативно-правовые требования продолжают ужесточаться, что приводит к росту расходов, увеличению сроков и усилению неопределенности.

За последние 50 лет в рамках традиционных моделей научно-исследовательской деятельности новые средства защиты сельскохозяйственных культур в среднем выходили на рынок через 12,3 года, а затраты на разработку одного действующего вещества превышали 300 млн. долл. США. Такие темпы уже не соответствуют современным вызовам, стоящим перед сельским хозяйством. Отрасль должна пересмотреть подходы к инновациям и их внедрению.

Пределы традиционных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

На протяжении десятилетий инновационный процесс развивался по линейной модели — от открытия до коммерциализации. Эта схема доказала свою эффективность, однако была сформирована для иной технологической и научной эпохи. Сегодня она все меньше соответствует темпам изменений в биологических и экологических системах. Сроки разработки новых продуктов по-прежнему превышают десять лет, тогда как устойчивость вредителей к действующим веществам может формироваться всего за несколько лет. Этот разрыв продолжает увеличиваться.

Ограничения, определяющие функционирование отрасли, в ближайшей перспективе вряд ли существенно изменятся. Продукты должны проходить испытания в течение нескольких вегетационных сезонов. Оценка

безопасности по-прежнему во многом опирается на исследования на животных моделях. Одновременно нормативно-правовая база в различных странах продолжает расширяться и ужесточаться. Все эти требования являются необходимыми, однако объективно ограничивают возможности ускорения инновационных процессов.

В каких областях адаптивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы могут принести наибольшие результаты

Адаптивные исследования и разработки представляют собой не просто ускорение всех этапов инновационного процесса. Речь идет о стратегической концентрации усилий там, где это наиболее целесообразно в текущих условиях, — прежде всего на этапе ранних исследований.

На этом этапе ограничения, связанные с полевыми сезонами, нормативными требованиями и необходимостью масштабной верификации, существенно снижаются. Это создает условия для быстрых итеративных экспериментов, в которых интегрированные вычислительные инструменты и высокопроизводительные методы проверки позволяют сократить длительность циклов с нескольких лет до одного-двух.

Ключевую роль в этом процессе играет поиск, основанный на искусственном интеллекте. Благодаря выявлению закономерностей, приоритизации новых механизмов действия и предварительному отбору кандидатов до этапа синтеза, такие системы позволяют уже на ранней стадии исключать соединения с низкой вероятностью успеха. В рамках ведущих исследовательских программ объем потенциальных кандидатов уже сокращается более чем на 90 % до начала синтеза, при этом повышается доля успешных результатов на ранних этапах разработки.

Это кардинально меняет подход к решению проблемы. Вместо попыток ускорить весь производственный цикл — значительная часть которого ограничена структурными факторами — адаптивные исследования и разработки позволяют оптимизировать распределение капитала на самых ранних этапах. Ресурсы направляются на проекты с более высокой вероятностью успеха, что снижает уровень отсевов на последующих стадиях и повышает вероятность вывода на рынок успешных продуктов.

Неудачи в такой системе перестают быть безвозвратными потерями и превращаются в вклад в непрерывный цикл обучения. В результате формируется более капиталоеффективная модель, которая расширяет пространство для инноваций и одновременно повышает качество принимаемых решений.

Результаты достигаются за счет концентрации усилий на тех направлениях, которые могут быть изменены в разумные сроки. Нормативные стандарты останутся строгими, а полевые испытания по-прежнему будут зависеть от сезонных циклов. Требования к безопасности в обозримой перспективе также существенно не изменятся.

Ключевая возможность заключается в том, чтобы действовать там, где ограничения минимальны, — на этапе раннего обнаружения. Сосредоточив инновационные усилия именно на этом направлении, отрасль может уже сегодня повысить скорость и эффективность разработки, не полагаясь на долгосрочные изменения в нормативной базе или подходах к тестированию. Именно в этой области адаптивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы способны дать наиболее быстрый и ощутимый эффект.

Почему устойчивость всё ещё имеет значение

Скорость и эффективность должны сочетаться с устойчивостью. Это требует развития разнообразных направлений исследований, использования различных механизмов действия и подтверждения результатов в разных регионах и на различных сельскохозяйственных культурах. Принципы устойчивого развития также необходимо учитывать уже на ранних этапах процесса открытий.

Сельское хозяйство развивается в условиях постоянной биологической эволюции, климатической нестабильности и геополитических факторов. Организации, которые последовательно внедряют адаптивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские подходы, могут повысить эффективность использования капитала, ускорить разработку новых решений и увеличить вероятность их своевременного внедрения для фермеров.

Вопрос уже не в том, сможет ли отрасль работать быстрее. Вопрос в том, сможет ли она переосмыслить сам процесс инноваций, сосредоточив капитал, знания и принятие решений там, где они дают наибольший эффект уже сегодня. Те, кто не сделает этого, рискуют еще больше отстать.

Архетипы могут ускорить адаптацию сельского хозяйства к сокращению снежного покрова¹⁹

Беатрис Л. Гордон, Габриэль Ф. С. Буарам, Кристин М. Альбано, Розмари В. Х. Кэрролл и Адриан А. Харполд

В статье, недавно опубликованной в журнале *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, отмечается, что будущие зимы, вероятно, будут характеризоваться уменьшением количества снегопадов и увеличением доли дождевых осадков. При этом подчёркивается, что существующие системы управления пока не готовы к таким изменениям. Авторы рассматривают адаптацию к сокращению снежного покрова как один из наиболее сложных и принципиальных вызовов, стоящих перед западными штатами США.

Сокращение количества снегопадов, а также уменьшение объемов сезонного снеготаяния оказывает существенное влияние на состояние экосистем, водоснабжение городских и сельских территорий, гидроэнергетику, рекреационную деятельность, туризм и сельское хозяйство. Последнее, являясь крупнейшим отраслевым потребителем пресной воды в мире, особенно уязвимо к последствиям сокращения снежного покрова.

Несмотря на то, что в настоящее время значительная часть западных штатов США переживает один из наиболее снежных сезонов за всю историю наблюдений, прогнозы относительно будущих климатических условий остаются неблагоприятными. По мере повышения температуры воздуха и сокращения количества снегопадов, согласно прогнозам, до 40% потребностей сельского хозяйства региона в водных ресурсах могут остаться неудовлетворенными. Аналогичные тенденции прогнозируются и для других регионов мира, включая южную Европу, высокогорные районы и Центральную Азию, западную часть России и южные районы Анд [*Qin et al.*, 2020].

В ответ на данные вызовы специалисты в области управления водными ресурсами разработали ряд подходов, направленных на адаптацию к сокращению снежного покрова. К ним относятся инфраструктурные решения, включая управляемое пополнение запасов подземных вод; природоориентированные меры, такие как лесохозяйственные мероприятия и со-

¹⁹ Источник: Beatrice L. Gordon, Gabrielle F. S. Boisrame, Christine M. Albano, Rosemary W. H. Carroll and Adrian A. Harpold. Archetypes Could Accelerate Agricultural Adaptation to Less Snowpack / <https://eos.org/opinions/archetypes-could-accelerate-agricultural-adaptation-to-less-snowpack> Опубликовано 9.06.2026

здание сооружений, имитирующих бобровые плотины; подходы, ориентированные на управление спросом, в частности многофункциональное репрофилирование земель (прим. перевод земель в новое использование с получением нескольких видов выгод); а также неоднозначно оцениваемые меры, основанные на увеличении предложения водных ресурсов, включая расширение емкости водохранилищ и искусственное воздействие на облака с целью стимулирования осадков (рис. 1).

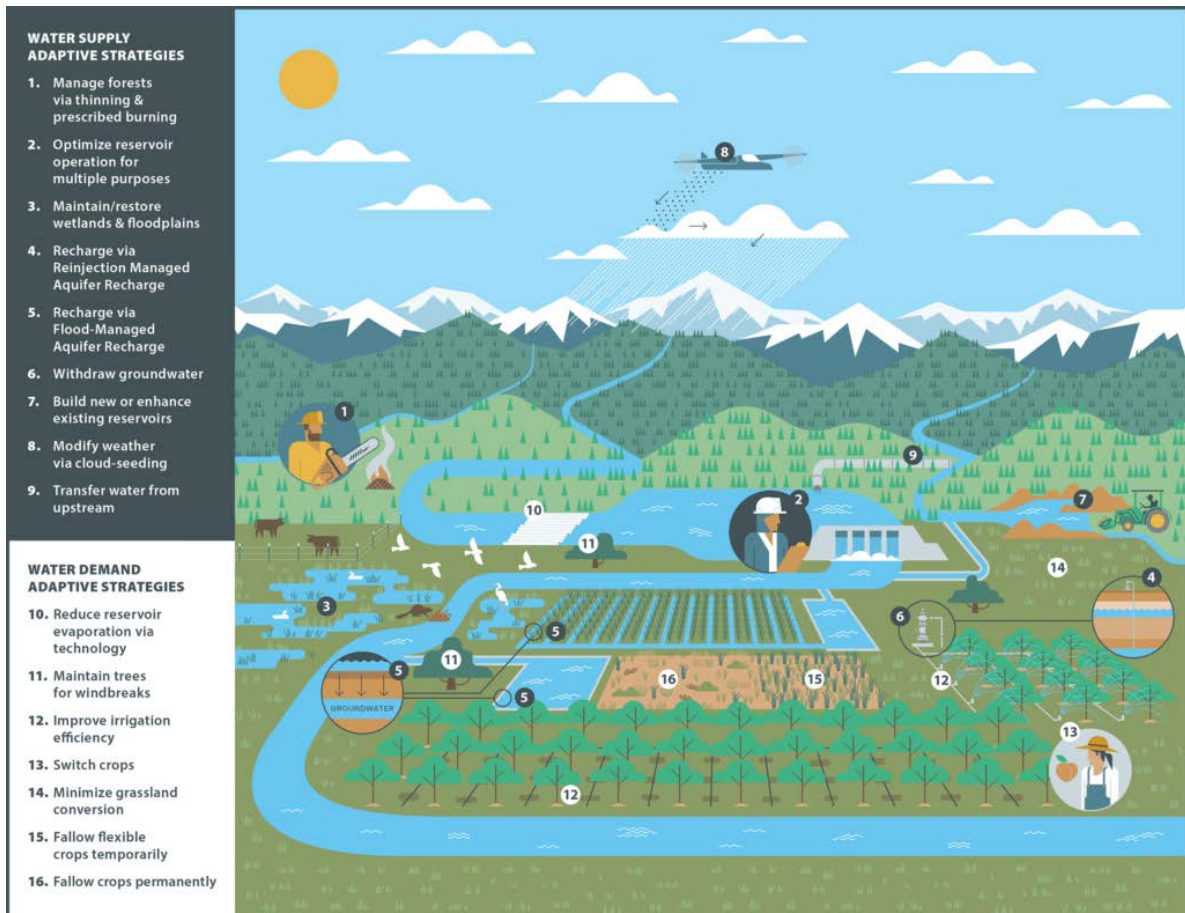


Рис. 1. Потенциальные подходы к снижению негативного воздействия сокращения снежного покрова на сельское хозяйство включают различные стратегии адаптации, направленные либо на увеличение доступности водных ресурсов (предложения воды), либо на сокращение потребности в воде (управление спросом)

Однако попытки определить, какие именно стратегии следует применять в различных водосборных бассейнах с использованием широкого спектра доступных подходов, как правило, приводят к двум типам методологических ошибок: либо к поиску нереалистичных универсальных решений [Ostrom, 2007], либо к рассмотрению каждого водосборного бассейна

как уникального случая, что сопряжено с высокими издержками и снижает эффективность принятия решений.

Важно отметить, что сохранение текущих тенденций означает, что к 2100 г. удастся компенсировать лишь около одной трети глобальных потерь урожайности, обусловленных изменением климата. В случае западных штатов США предыдущие исследования показывают, что совокупные экономические потери, связанные с сокращением снежного покрова, могут составлять от сотен миллиардов до триллионов долларов; при этом подчеркивается, что принятию обоснованных адаптационных решений препятствует недостаток экономических оценок значимости снежных ресурсов [Sturm et al., 2017].

Таким образом, авторы полагают, что «вопрос на триллион долларов» заключается не в самой необходимости адаптации, а в определении территорий, где существующие стратегии могут обеспечить наибольший и наиболее быстрый эффект в части компенсации прогнозируемых потерь. Ответ на этот вопрос требует подхода, при котором стратегии подбираются с учетом конкретных условий, в которых они имеют наибольшие шансы на успех, — подхода, при котором водосборные бассейны рассматриваются не как однородные и не как полностью уникальные системы.

Несоответствие между масштабами научных исследований и оперативной деятельности

Ученые-физики, как правило, рассматривают проблему таяния снега в масштабе водосборного бассейна, отчасти потому, что такой подход соответствует гидрологическим границам. Однако, как отмечает наш коллега, экономист-прикладник Джои Блумберг, границы административных округов не совпадают с водоразделами, а речные системы не следуют политическим границам, в результате чего формируется «мозаика несовпадающих границ».

Ученые уже давно подчеркивают, что для смягчения последствий изменения климата необходимо мыслить глобально, оценивать ситуацию на региональном уровне и действовать на местном уровне. В 1992 г. авторы Дублинских принципов пришли к выводу, что для достижения реального прогресса в решении сложных проблем, связанных с водой, необходимо принимать решения на «самом низком целесообразном уровне», где заинтересованные стороны могут наиболее эффективно взаимодействовать.

Сложность заключается в том, что понятие «местный уровень» не является единообразным и однозначно определенным. В недавнем исследовании была рассмотрена концепция «наименьшего целесообразного

уровня» управления водными ресурсами в сельском хозяйстве на Западе США. В качестве местных операционных контекстов были выделены посреднические структуры — ирригационные округа, водохозяйственные управления и водохозяйственные кооперативы, — которые обеспечивают связь между отдельными фермерами и гидрологическими ресурсами [Gordon et al., 2024].

Работая в таком масштабе, авторы обнаружили, что универсальные стратегии зачастую оказываются неэффективными даже в пределах одного гидрологического бассейна [Gordon et al., 2024; Boisramé et al., 2026]. Например, в верховьях бассейна реки Колорадо увеличение объема водохранилищ могло бы смягчить последствия сокращения снежного покрова для сельского хозяйства в северо-восточной части штата Юта, однако та же стратегия может оказаться малоэффективной в нескольких милях оттуда, в юго-западной части штата Вайоминг, где более засушливые климатические условия затрудняют пополнение водохранилищ.

Сбор детальной информации на местном уровне только по 13 из примерно 2 600 операционных контекстов по всей стране занял почти три года, поскольку потребовал анализа веб-сайтов, изучения рабочих документов и прямого взаимодействия с руководителями водохозяйственных организаций.

Распространение такого подхода на всю западную часть США, как и следовало ожидать, представляет собой чрезвычайно сложную задачу. В связи с этим подчеркивается необходимость более систематического подхода, который позволил бы руководителям определять, какие стратегии могут быть наиболее эффективными и в каких регионах.

Диагностика в области сельского хозяйства и потерь, связанных со снегом

Остром [2007] утверждала, что сложные системы, такие как сельское хозяйство на западе США, «по своей структуре частично декомпозируемы». Это положение лежит в основе анализа архетипов — подхода, позволяющего выявлять повторяющиеся закономерности в системах, которые в остальном существенно различаются.

Подобно оценкам на рабочем месте — которые, несмотря на свою несовершенство, являются полезным инструментом для понимания эффективных стилей управления, — архетипы используют качественные, количественные или гибридные методы для группировки разнообразных операционных контекстов на основе общих характеристик [Sietz et al., 2019]. Такие группировки позволяют осуществлять систематическую пе-

редачу знаний, например о том, как стратегии управления, эффективные в одном контексте, могут служить ориентиром для адаптации в других условиях.

Как отмечает Элизабет Кебеле, занимающаяся исследованием устойчивости городских водных систем [García et al., 2019] и применяющая архетипический подход в данной области, исследователи могут эмпирически выделять составные элементы, из которых формируются архетипы, отражающие ключевые характеристики системы. При этом она подчеркивает, что данные элементы варьируют в зависимости от контекста системы, доступных данных и целей исследования.

Авторы выделяют три основных фактора, взаимодействие которых определяет условия ведения сельского хозяйства, зависящего от снежных ресурсов, в западных штатах США: физические ограничения, системы управления и поведение пользователей. Физические ограничения, включая биофизические условия, инфраструктуру и климатические факторы, определяют объем доступных водных ресурсов. Возможности системы управления, учитывающие сложность институциональных и организационных процессов, определяют порядок распределения этих ресурсов между конкурирующими видами водопользования. Поведение пользователей влияет как на уровень спроса на воду, так и на характер их реакции на условия водоснабжения и правила управления.

Использование данных характеристик для выделения архетипов контекстов управления водными ресурсами может способствовать определению практических путей реализации подходов, направленных на ускорение успешной адаптации к сокращению снежного покрова на западе США.

Ограничения, связанные с использованием талой воды в качестве источника водоснабжения

Физические ограничения обусловлены биофизическими процессами, определяющими, как, когда и в каком объеме снежный покров преобразуется в речной сток; инфраструктурой, используемой для хранения и транспортировки воды; а также гидрологической и климатической неопределенностью, связанной с будущими водными ресурсами. Эти ограничения могут существенно различаться между отдельными водосборными бассейнами.

В качестве примера рассматриваются бассейн реки Уокер и долина Сан-Хоакин в Калифорнии — оба региона зависят от снежного покрова Сьерра-Невады, однако характеризуются различными биофизическими условиями. В некоторых частях центральной Сьерры мероприятия по

управлению лесами могут снижать риск лесных пожаров и увеличивать речной сток до 14% в годы с малоснежными условиями. Вместе с тем в других районах вода, высвобождаемая в результате таких мероприятий, может быть частично потреблена оставшейся растительностью, что ограничивает увеличение стока в низовьях бассейна.

Эти биофизические различия взаимодействуют с режимами эксплуатации инженерной инфраструктуры, включая ирригационные системы, водосбросы водохранилищ и каналы, определяя характер и временные параметры накопления и сброса воды. По мере повышения температур и сокращения объёмов снежного покрова органы управления водными ресурсами в бассейнах реки Уокер и долины Сан-Хоакин всё чаще вынуждены учитывать более широкий спектр экстремальных условий, включая так называемые засухи с низкой температурой воды. При этом инфраструктура, позволяющая управлять данными компромиссами посредством аккумуляирования воды в водохранилищах и регулирования водопользования с учетом баланса между сельскохозяйственными потребностями и требованиями водных экосистем, развита в более регулируемом бассейне реки Сан-Хоакин в большей степени, чем в бассейне реки Уокер.

К биофизическим и инфраструктурным ограничениям добавляются климатическая и гидрологическая неопределенность, включая, например, вопрос о том, приведет ли сокращение снежного покрова к увеличению эвапотранспирации и, как следствие, к снижению речного стока. Эти неопределенности затрудняют принятие решений, основанных на моделировании соотношения затрат и выгод отдельных стратегий, в частности в отношении таких вопросов, как целесообразность увеличения емкости водохранилищ при противоречивых прогнозах относительно будущих осадков. Подходы, связанные с концепцией принятия решений в условиях глубокой неопределенности, подчеркивают необходимость выбора стратегий, устойчивых к широкому спектру возможных сценариев будущего.

Вместе с тем, благодаря развитию современных инструментов, становится все более возможной количественная оценка физических факторов, ограничивающих таяние снега в масштабах водосборных бассейнов, что, наряду с совершенствованием методов моделирования, позволяет снижать уровень гидроклиматической неопределенности. Специалисты в области управления водными ресурсами могут использовать, например, базы данных, такие как ResOpsUS Геологической службы США [Steyaert *et al.*, 2022], содержащую исторические данные об эксплуатации водохранилищ на территории континентальной части США, а также открытые гидрологические прогнозы, включая ансамблевые данные шестой фазы проекта сравнения связанных моделей (CMIP6, Coupled Models Intercomparison Project phase 6), предоставляемые Окриджской национальной лабораторией.

Система управления регулирует распределение водных ресурсов

Авторы рассматривают управление водными ресурсами с точки зрения двух характеристик — потенциала и сложности. Потенциал в данном контексте определяется как способность заинтересованных сторон «мобилизовать ресурсы для принятия справедливых и беспристрастных решений по общим проблемам», как отмечает исследовательница в области управления Джина Гилсон. Сложность, в свою очередь, определяется числом и степенью институциональной фрагментированности юрисдикций, органов власти, нормативных актов и вовлеченных заинтересованных сторон. По мере увеличения сложности системы управления эффективность адаптационных стратегий все в большей степени зависит от ограниченности управленческого потенциала, особенно в отношении сроков реализации и доступного финансирования.

Например, инфраструктура в бассейне реки Уокер находится под контролем единого местного водохозяйственного округа, тогда как координация между юрисдикциями осуществляется с участием двух штатов и племени пайютов реки Уокер. Координация в сфере управления водными ресурсами в любом случае является сложной задачей, однако меньшее число вовлеченных юрисдикций, как правило, способствует более быстрому принятию решений и более четкому распределению полномочий. Это позволяет единому водному округу более оперативно реализовывать такие стратегии, как многофункциональное репрофилирование земель, что, в свою очередь, способствует сокращению объема воды, используемого в сельском хозяйстве и, как следствие, восстановлению озера Уокер и реинтродукции исчезающих видов.

Долина Сан-Хоакин существенно отличается по масштабам и институциональной сложности: она охватывает восемь округов штата Калифорния, при этом только в одном из них насчитывается 22 водохозяйственных округа и семь городов. После принятия закона штата Об устойчивом управлении подземными водами водопользователи бассейна создали более 120 агентств по обеспечению устойчивого управления подземными водами. Таким образом, управление водными ресурсами в сельском хозяйстве предполагает взаимодействие федеральных и региональных систем, функционирующих в соответствии с различными правилами, соглашениями и нормативными требованиями. Хотя программы по репрофилированию земель могут быть реализованы, их внедрение, как правило, требует значительных временных, финансовых и институциональных ресурсов.

Такие новые инициативы, как «Инструмент доступа к данным и анализа водных ресурсов западных штатов» (WestDAAT) и Гармонизирован-

ная база данных о правах на воду в западных штатах США, упрощают оценку системы управления в бассейне за счет стандартизации данных о правилах, нормативных актах и правах на воду в разных штатах. В сочетании с картографированием зон орошения и перекачки воды [Siddik *et al.*, 2023], эти ресурсы помогают заинтересованным сторонам определить вовлеченные юрисдикции, характер распределения полномочий и существующие механизмы координации в сфере управления водными ресурсами в сельском хозяйстве.

Поведение людей определяет реакции спроса

После поступления талой воды к конечным водопользователям динамика поведения — то есть то, как люди реагируют на кризисные ситуации, меры политики и изменяющиеся условия — определяет, в какой степени стратегии управления позволяют достигать ожидаемых результатов.

На спрос на воду влияют потребительские предпочтения, а также экономические, политические и культурные факторы. Кроме того, на него воздействуют переменные, которые в традиционных гидрологических моделях часто не учитываются, включая социальную структуру, социальную память и уровень благосостояния. В частности, более обеспеченные потребители, как правило, реже изменяют свое поведение в сторону сокращения водопотребления в условиях дефицита водных ресурсов.

Например, динамика спроса на воду в бассейне реки Саут-Платт характеризуется высокой сложностью, поскольку водопользование распределено между городскими территориями, сельским хозяйством и экосистемами в пределах штатов Колорадо, Небраска и Вайоминг. В рамках проекта «Биг Томпсон» в этом бассейне — федеральной системы водозабора на севере Колорадо — цены на воду выросли с 1 500 долларов за акр-фут ($\approx 1\,233\text{ м}^3$) фут в 1990 г. до более чем 30 000 долларов в 2018 г. под воздействием экономических факторов, что сопровождалось перераспределением прав на воду: доля городского водопользования увеличилась до 70 % за счет сокращения доли воды, ранее использовавшейся в сельском хозяйстве.

Даже при наличии надежных прогнозов будущего климата и водобеспеченности тщательно разработанные стратегии адаптации могут оказаться недостаточными для противодействия экономическим и поведенческим факторам, что приводит к перераспределению и изменению направлений водопользования. Более того, поведенческие реакции на меры адаптации могут, парадоксальным образом, приводить к росту спроса на воду в

случаях, когда пользователи воспринимают снижение риска дефицита как устойчивое улучшение водообеспеченности.

Так называемый «эффект водохранилища» возникает в ситуациях, когда ощущение повышенной обеспеченности водными ресурсами стимулирует расширение водоемких видов деятельности [Di Baldassarre *et al.*, 2018]. Аналогичным образом, «парадокс повышения эффективности орошения» демонстрирует, что рост эффективности водопользования может приводить к расширению производства и сокращению возвратных стоков (то есть объема оросительной воды, возвращающейся в речные системы и водоносные горизонты) в нижележащих частях бассейна [Grafton *et al.*, 2018].

Для анализа влияния человеческого поведения на гидрологические системы использовались концептуальные рамки, моделирование и глобальные тематические исследования. При наличии достаточного объема обучающих данных методы машинного обучения могут быть использованы для более глубокого изучения того, как поведение пользователей влияет на процессы адаптации, а также для прогнозирования изменений в условиях продолжающегося сокращения снежного покрова.

Архетипы на практике

Анализ того, как физические факторы, системы управления и поведение пользователей влияют на результаты в таких регионах, как бассейны рек Уокер, Саут-Платт и Сан-Хоакин, позволяет исследователям и практикам разрабатывать типовые модели (архетипы), которые помогают выявлять закономерности эффективности различных стратегий в разных условиях, а также оценивать возможности переноса накопленного опыта из одной системы в другую (рис. 2).

Бассейн реки Уокер рассматривается как типичный пример архетипа, характерного для верховьев рек на западе США, где преобладает сельскохозяйственная деятельность и который отличается низкой сложностью системы управления (небольшое число юрисдикций), достаточным управленческим потенциалом (наличие ресурсов), низкой поведенческой сложностью (относительно предсказуемые и однородные группы пользователей) и значительными физическими ограничениями (существенное сокращение снежного покрова в будущем и ограниченная инфраструктура для хранения и пополнения водных ресурсов).

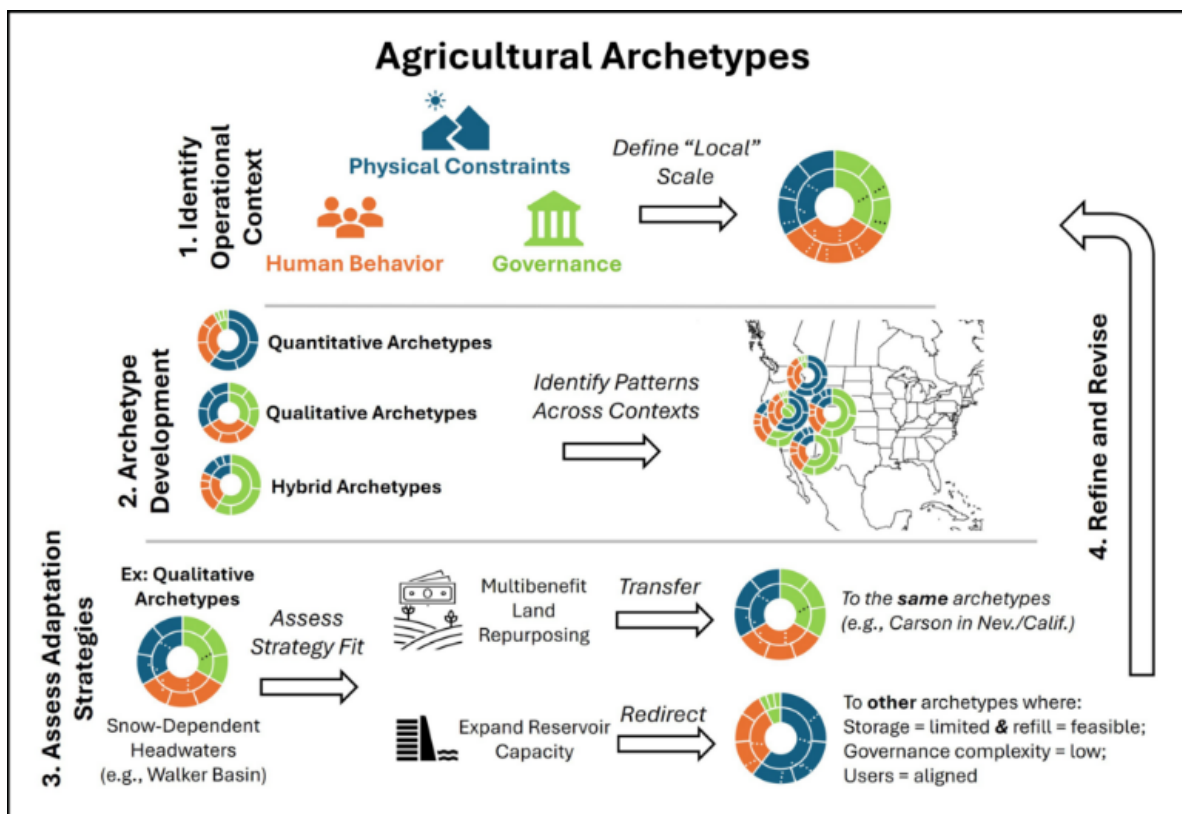


Рис. 2. Диагностическая методика, основанная на архетипах и учитывающая оценку физических ограничений, механизмов управления и поведенческой динамики, влияющих на водосборные бассейны, может способствовать более быстрому распространению опыта успешных стратегий адаптации в сельском хозяйстве западных штатов США, зависящем от таяния снежного покрова

Благодаря таким характеристикам бассейн реки Уокер представляет собой удобную площадку для оценки эффективности различных стратегий, направленных на компенсацию изменений в режиме снеготаяния. В частности, рассматриваются вопросы о том, способствует ли искусственное засевание облаков увеличению толщины снежного покрова; могут ли аналоги бобровых плотин — природоориентированное решение, напоминающее инициативу Департамента рыбного и охотничьего хозяйства штата Айдахо середины XX века по расселению бобров в природной среде с использованием парашютов, — существенно повысить водоудерживающую способность ландшафтов; и может ли многофункциональное репрофилирование земель снизить уязвимость населения и экосистем к колебаниям водоснабжения, одновременно восстанавливая экосистемные функции.

Ценность систематизации операционных контекстов в виде архетипов заключается в том, что каждый контекст не обязательно рассматривать как уникальный. Опыт, полученный в рамках «Уокер»-подобных систем,

может быть систематически перенесен на другие регионы с аналогичными характеристиками и впоследствии проверен в различных прикладных условиях.

Река Саут-Платт характеризуется физическими ограничениями, сопоставимыми с бассейном реки Уокер, однако отличается более высокой сложностью системы управления вследствие наличия множества межштатных соглашений, а также более сложной поведенческой динамикой. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что стратегии, ориентированные на управление спросом, могут способствовать адаптации к более нестабильному водоснабжению в бассейне реки Саут-Платт [Gharib et al., 2023]. Однако их реализация требует учета интересов как сельскохозяйственных, так и городских водопользователей, что отражает более сложную поведенческую динамику по сравнению с бассейном реки Уокер.

Переход на выращивание более высокодоходных культур на меньших площадях может способствовать снижению общего водопотребления. Однако возможности выбора культур, пригодных для выращивания в различных регионах, ограничиваются такими факторами, как высота над уровнем моря и климатические условия. Даже в случаях, когда такой переход возможен, внедрение новых культур требует инвестиций в образование, развитие инфраструктуры, управление рисками и накопление агрономических знаний.

По мере постепенного расширения и эмпирической проверки возможно уточнение общих архетипов, таких как «высокая поведенческая сложность», с учетом динамических процессов, включая конкуренцию между сельскими и городскими территориями, а также явлений, связанных с экономикой приобретения и осушения земель. Архетипы также могут указывать на ситуации, в которых сложность системы управления свидетельствует о том, что принятие решений осуществляется выше минимально целесообразного уровня.

Одним из таких примеров является река Сан-Хоакин, система управления которой характеризуется чрезвычайной сложностью и включает множество местных, штатных и федеральных ведомств, ответственных за управление поверхностными и подземными водными ресурсами. Учет данной закономерности может помочь определить, в каких случаях реализация программ, подобных LandFlex, требующих законодательного одобрения, межведомственной координации и участия широкого круга заинтересованных сторон, может сопровождаться значительными временными и ресурсными затратами. Это, в свою очередь, может указывать на необходимость выделения более мелких операционных контекстов в рамках более широких аналитических рамок для ускорения процессов внедрения.

Применение архетипов на практике: от диагностики к действию

Разработка системного подхода, позволяющего соотносить стратегии адаптации с областями, где они имеют наибольшие шансы на успех, является лишь первым шагом. Проведение диагностики без механизмов внедрения соответствующих стратегий зачастую оказывается недостаточным для своевременного принятия мер.

Показательный пример успешного управления качеством воды относится к 1970-м гг. К этому времени меры по снижению промышленного загрязнения были существенно усовершенствованы по сравнению с началом XX века, однако качество поверхностных вод в стране продолжало ухудшаться из-за загрязнения, связанного с сельскохозяйственными стоками. Существенным сдвигом стало внедрение программы Агентства по охране окружающей среды США (EPA) «Общая максимальная суточная нагрузка» (TMDL), в рамках которой был сформирован структурированный процесс, предусматривающий установление измеримых целей по сокращению загрязнения и распределение ответственности за их достижение между источниками загрязнения, что позволило обеспечить реализацию мер управления на местном уровне.

Архетипы могли бы играть аналогичную роль в содействии разработке эффективных мер адаптации к сокращению снежного покрова, а структура, подобная программе TMDL, могла бы начинаться с оценки рисков, связанных с соотношением спроса и предложения в различных операционных зонах, установления целевых показателей эффективности, таких как надежность водоснабжения и частота возникновения дефицита, а затем использовать результаты диагностики для определения стратегий, наиболее соответствующих каждому архетипу. Полученными результатами и выводами можно было бы делиться на региональном уровне, при этом реализация мер оставалась бы в ведении местных органов власти.

Данное предложение, следует подчеркнуть, не представляет собой рекомендацию конкретных механизмов политики. Вместе с тем оно служит напоминанием о том, что, подобно тому, как немногие участвуют в оценках на рабочем месте или изменяют свое поведение на основе их результатов без институциональной поддержки, использование архетипов должно быть сопряжено с соответствующими механизмами реализации, чтобы обеспечить переход от диагностики к практическим действиям.

За пределами «серебряных пуль»

Единого ответа на «триллионный» вопрос не существует, однако одним из путей обеспечения устойчивости сложных экосистем западных регионов является разработка архетипов различных типов водосборных бассейнов.

Почти 20 лет назад *Остром* [2007] предостерегала от поиска универсальных решений сложных экологических проблем. Как показывается в настоящей работе, не существует «чудодейственного средства» для адаптации к сокращению снежного покрова и единого ответа на рассматриваемый «триллионный» вопрос; тем не менее одним из подходов к сохранению устойчивости сложных экосистем западных регионов остается разработка архетипов различных типов водосборных бассейнов.

Например, небольшому ирригационному округу не требуется самостоятельно тестировать каждую стратегию, представленную на рис. 1, или разрабатывать сложные инструменты поддержки принятия решений, если в рамках соответствующего архетипа уже были оценены стратегии, эффективные в сопоставимых условиях управления, поведенческих факторов и физических ограничений.

Важно отметить, что данные архетипы могут уточняться и совершенствоваться исследователями и практиками с целью более точного отражения сложных аспектов реальности. Так, архетипы с преобладанием физических ограничений могут включать регионы, характеризующиеся высокой неопределенностью будущих условий или ограниченной гибкостью водоносных горизонтов. Аналогичным образом, аспекты, связанные с управлением и поведением, могут быть расширены для учета ситуаций, в которых субсидии формируют несогласованные стимулы, либо когда культурные нормы связывают водопользование с локальной идентичностью и традициями.

Как и в случае с оценками на рабочем месте, цель заключается не в нивелировании различий, а в их более стратегическом использовании. Архетипы позволяют определить, в каких случаях не требуется «изобретать велосипед» для адаптации, а в каких — необходима его модификация. Использование коллективных знаний и опыта регионов, сталкивающихся с аналогичными вызовами, вместо разработки уникальных решений для каждого водосборного бассейна, может сократить время и ресурсы, необходимые для внедрения справедливых и устойчивых мер адаптации.

Производство сельскохозяйственных культур и продовольственная безопасность

**Несмотря на изменение климата,
мировое производство риса за 50 лет
почти удвоилось²⁰**

Согласно новому исследованию Иллинойского университета в Урбане-Шампейне, в период с 1960-х по 2010-е годы мировое производство риса выросло почти вдвое, несмотря на негативные последствия изменения климата. Исследование показало, что управленческие решения, в том числе расширение ирригационных систем и увеличение количества вносимых удобрений, сыграли ключевую роль в поддержании производства риса и компенсации потерь, связанных с изменением климата.

Результаты исследования позволяют предположить, что продовольственная безопасность в будущем будет зависеть не только от состояния окружающей среды, но и от того, как системы производства риса управляются и адаптируются к меняющимся условиям.

Исследователи оценили, как изменения окружающей среды и управление сельским хозяйством вместе повлияли на производство риса в разных регионах. Результаты опубликованы в журнале Scientific Reports.

Рис находится на стыке продовольственной безопасности, экономического развития и изменений окружающей среды. Сегодня большая часть мирового производства риса сосредоточена в Азии, при этом на Китай, Индию и страны Южной и Юго-Восточной Азии приходится наибольшая доля мирового производства, - пояснил профессор климата, метеорологии и атмосферных наук Атул Джайн.

Исследование также показало, что изменение климата – единственный фактор, который, согласно анализу, привёл к сокращению производства риса. В период с 2006 по 2015 год мировое производство риса сократилось примерно на 7% из-за повышения температуры, теплового стресса и нехватки воды. В то же время повышение концентрации CO₂ в атмосфере стало основным экологическим фактором, способствовавшим увеличе-

²⁰ Источник: <https://glavagronom.ru/news/nesmotrya-na-izmenenie-klimata-mirovoe-proizvodstvo-risa-za-50-let-pochti-udvoilos> Опубликовано 12.06.2026

нию производства риса за счёт усиления фотосинтеза и повышения эффективности использования воды.

В совокупности эти результаты показывают, что изменения окружающей среды влияют на сельскохозяйственное производство сложным и порой противоречивым образом.

Как показывает наше исследование, изменение климата уже влияет на производство риса в некоторых из самых важных регионов его выращивания. Наибольшие потери в производстве риса, связанные с изменением климата, пришлись на Индию, за ней следуют Индонезия и Китай, что подчеркивает важность разработки стратегий управления, которые позволят сохранить производство риса и адаптироваться к растущему климатическому давлению, - отметил Джайн.

В планах ученых использовать эту концепцию для определения путей удовлетворения будущего спроса на рис в условиях меняющегося климата и повышения долгосрочной устойчивости сельскохозяйственных систем.

Рис кормит миллиарды людей, но его роль в изменении климата становится всё более значительной²¹

**Ханьцин Тянь, Цзинтин Чжан, Пеп Канадель
и Шуфэнь (Сьюзан) Пань**

Рис обеспечивает продовольствием более половины населения мира. От террасированных рисовых полей Юго-Восточной Азии до орошаемых сельскохозяйственных угодий Китая и Индии — эта культура составляет основу ежедневного рациона миллиардов людей.

Однако те же затопленные почвы, которые способствуют росту риса, создают идеальные условия для жизнедеятельности микроорганизмов, выделяющих парниковые газы, способствующие изменению климата.

В ходе нового исследования наша группа ученых, специализирующихся в области экологии и сельского хозяйства, установила, что с 1960-х

²¹ Источник: Hanqin Tian, Jingting Zhang, Pep Canadell and Shufen (Susan) Pan. Rice feeds billions of people – but its role in fueling climate change is growing / <https://japantoday.com/category/features/environment/rice-feeds-billions-of-people-%E2%80%93-but-its-role-in-fueling-climate-change-is-growing> Опубликовано 29.05.2026

гг. объем выбросов парниковых газов с рисовых полей во всем мире почти удвоился. В 2010-х гг. они в среднем составляли около 1,1 млрд тонн в эквиваленте диоксида углерода в год, что сопоставимо с годовыми выбросами примерно 239 млн автомобилей.

Таким образом, рисоводство становится одним из крупнейших источников выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве после животноводства, при этом ожидается, что мировой спрос на рис будет и далее расти.

Вместе с тем у фермеров имеются возможности сократить выбросы, связанные с выращиванием риса, без снижения урожайности. Наше исследование показало, что если все производители будут применять наиболее эффективные из доступных сегодня климатически оптимизированных методов, то к середине XXI века глобальные выбросы от выращивания риса можно будет сократить примерно на 10 %. Однако для существенного замедления темпов изменения климата потребуются гораздо более значительные сокращения выбросов, что, в свою очередь, потребует разработки и внедрения дополнительных, более эффективных стратегий.

Почему увеличились выбросы от выращивания риса

Рост выбросов парниковых газов при выращивании риса обусловлен двумя основными факторами: расширением площадей под рисоводство и интенсификацией сельскохозяйственного производства.

Немногим более половины общего увеличения выбросов связано с расширением посевных площадей. Так, в Африке площади, занятые рисоводством, с 1960-х гг. выросли примерно вдвое, что стало одной из причин двукратного увеличения выбросов метана в регионе.

Одновременно с этим производители риса стали активнее применять минеральные удобрения и органические добавки, такие как солома и навоз, использовать более урожайные сорта и увеличивать плотность посадки растений. Эти меры позволяют получать более высокие урожаи, однако сопровождаются ростом выбросов парниковых газов.

Наше исследование показало, что одна из наиболее распространенных агротехнических практик — оставление рисовой соломы на поле после уборки урожая с последующей заделкой в почву для повышения её плодородия — стала причиной примерно 18 % общего роста чистых выбросов, связанных с выращиванием риса, начиная с 1960-х гг.

Это объясняется тем, что дополнительное органическое вещество, поступающее в почву, разлагается микроорганизмами в условиях затопления, что приводит к увеличению выбросов метана.

Еще одним значительным источником выбросов являются азотные удобрения. После 2000 г. объемы применения синтетических азотных удобрений увеличились примерно на 76 %, что привело к росту выбросов закиси азота — одного из наиболее мощных парниковых газов. По нашим оценкам, этот фактор обеспечил около 9 % прироста общих глобальных чистых антропогенных выбросов.

Существенное влияние на объем выбросов оказывают и методы орошения. Традиционно орошаемые рисовые поля оставались затопленными на протяжении всего вегетационного периода, что способствовало постоянному образованию парниковых газов в результате деятельности микроорганизмов, активно развивающихся в анаэробных условиях. Однако в последние два десятилетия все больше фермеров стали применять технологию периодического затопления, предусматривающую чередование фаз затопления и осушения полей.

Такой подход позволил сократить выбросы метана по сравнению с практикой постоянного затопления. Вместе с тем наше исследование выявило незначительное увеличение выбросов оксидов азота, связанное с чередованием влажных и сухих условий в почве. Эти изменения стимулируют деятельность микроорганизмов, которые преобразуют содержащийся в почве азот в газообразные соединения семейства оксидов азота, прежде всего в закись азота.

Воздействие производства риса на климат

Оценить совокупное воздействие производства риса на климат значительно сложнее, чем измерить выбросы отдельных парниковых газов.

Из влажных и затопленных почв выделяются метан и закись азота, тогда как в период вегетации растения риса поглощают углекислый газ из атмосферы. В межсезонье, напротив, из почвы может происходить высвобождение накопленного углерода.

Для получения достоверной глобальной оценки необходимо комплексно учитывать потоки различных парниковых газов, изменения запасов углерода в почве, а также неопределенности, связанные с пространственной и временной изменчивостью имеющихся данных.

Для этого мы объединили три взаимодополняющих подхода:

1. **Экосистемное моделирование.** Была использована компьютерная экосистемная модель для симуляции роста сельскохозяйственных культур, водного режима и почвенных процессов, что позволило одновременно оценивать изменения выбросов метана и закиси азота, а также динамику углерода в почве.

2. **Машинное обучение.** Модель на основе методов искусственного интеллекта была применена для уточнения оценок в условиях ограниченной доступности данных и обеспечения охвата всех основных рисоводческих регионов мира.

3. **Метаанализ полевых исследований.** Было проведено обобщение результатов более чем 1 200 полевых экспериментов, что позволило получить эмпирические данные о влиянии агротехнических практик — включая орошение, внесение удобрений и управление пожнивными остатками — на объемы выбросов.

В совокупности эти подходы позволили количественно оценить объемы выбросов за период с 1961 по 2020 гг., определить ключевые факторы, обусловившие их изменение, а также оценить эффективность методов сокращения выбросов в условиях будущих климатических сценариев.

Что работает, а что нет в смягчении последствий изменения климата

Существуют различные способы сокращения выбросов при производстве риса без снижения урожайности.

Согласно результатам исследования, комплекс мер, включающий снижение объемов внесения удобрений и пожнивных остатков, оптимизацию режимов орошения с чередованием периодов затопления и осушения, а также уменьшение интенсивности почвообработки, в совокупности может обеспечить сокращение глобальных выбросов парниковых газов при выращивании риса примерно на 10 % к середине XXI века.

При этом было установлено, что замена синтетических удобрений на альтернативные «экологичные» варианты не всегда приводит к снижению выбросов парниковых газов, несмотря на их распространенность в органическом земледелии.

Умеренное сохранение соломы и других растительных остатков на поле может способствовать повышению плодородия почвы, однако их избыточное накопление может приводить к увеличению выбросов метана и ускоренной потере углерода из почвы. В качестве альтернативного подхода рассматривается преобразование части растительных остатков в био-

уголь посредством пиролиза в условиях ограниченного доступа кислорода с последующим внесением в затопленные почвы. Биоуголь способен способствовать стабилизации углерода в почве и снижению выбросов метана.

Улучшение системы управления водными ресурсами может стать эффективным инструментом сокращения выбросов. Периодическое осушение рисовых полей снижает выделение метана, хотя при этом может приводить к незначительному увеличению выбросов закиси азота. Данная стратегия особенно эффективна в регионах с развитой ирригационной инфраструктурой, включая значительную часть стран Азии.

Управление внесением удобрений также представляет собой действенную меру смягчения климатического воздействия, особенно в системах с интенсивным применением азотных удобрений, характерных для отдельных регионов Китая и Южной Азии. Избыточное внесение азота приводит к росту выбросов закиси азота без сопоставимого увеличения урожайности и одновременно усиливает загрязнение водных ресурсов. Сокращение избыточного применения азота позволяет снизить как выбросы парниковых газов, так и уровень загрязнения воды, а также уменьшить затраты фермеров.

Влияние обработки почвы, вспашки между посевными сезонами, существенно варьирует в зависимости от региона. Сокращение обработки почвы часто рассматривается как климатически благоприятная мера, однако в системах с постоянным затоплением она не всегда приводит к снижению чистых выбросов. В рисоводческих системах умеренных широт, включая значительную часть территории США и Китая, более низкие температуры могут ограничивать образование метана, вследствие чего положительный эффект от сокращения обработки почвы, связанный с накоплением углерода в почве, может превышать потенциальный рост выбросов метана. Однако в более тёплых и постоянно затопленных системах условия с низким содержанием кислорода могут усиливать активность микроорганизмов, что приводит к увеличению выбросов метана и ускоряет потерю углерода из почвы.

В целом был сделан вывод о том, что универсального подхода, подходящего для всех регионов, не существует. Каждому региону необходимо самостоятельно определять наиболее эффективные меры по сокращению выбросов.

Климат как фактор, сдерживающий производство риса

Этот вывод одновременно вселяет надежду и заставляет задуматься: целенаправленное применение набора оптимизированных практик позволяет существенно сократить выбросы без снижения урожайности риса, однако общий потенциал глобального сокращения остается ограниченным.

Для дальнейшего снижения выбросов потребуются более точные и дифференцированные рекомендации, которые позволят фермерам оптимизировать дозы органических удобрений, таких как солома или биоуголь, а также внедрять новые подходы, обеспечивающие сокращение выбросов без ущерба для производства риса.

Перевод: Юлдашева Г.

Верстка и дизайн: Беглов И.Ф., Дегтярева А.С.

Подготовлено к печати
в Научно-информационном центре МКВК

Республика Узбекистан, 100 187,
г. Ташкент, м-в Карасу-4, д. 11А

sic.icwc-aral.uz