



Federal Ministry  
for the Environment, Climate Action,  
Nature Conservation and Nuclear Safety

IKI



INTERNATIONAL  
CLIMATE  
INITIATIVE



**ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ВОДОЙ,  
ЭНЕРГИЕЙ И ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЕМ**  
Системные решения для климатически устойчивой Центральной Азии



# ТРАНСФОРМАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА:

биотехнологии, водные ресурсы  
и устойчивость



**НИЦ МКВК**

Научно-информационный центр  
Межгосударственной координационной  
водохозяйственной комиссии  
Центральной Азии

Ташкент 2026



Научно-информационный центр  
Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии  
Центральной Азии

**Трансформация  
сельского хозяйства:  
биотехнологии,  
водные ресурсы  
и устойчивость**

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

<b>Биология растений и микробиота почв.....</b>	<b>5</b>
Древний кустарник, способный изменить будущее растительного белка.....	5
Внесение удобрений может вредить полезным почвенным бактериям .....	9
Рост растений приостанавливается под воздействием стрессовых факторов и возобновляется при улучшении условий.....	10
Разработан метод защиты растений от болезней и засухи с помощью веществ из перегноя .....	13
Засуха усиливает устойчивость бактерий к антибиотикам – тревожный вывод ученых .....	15
Ученые нашли ген, который заставит корни зерновых «бурить» землю в поисках воды.....	16
Сенсорную систему, предупреждающую о засолении почвы, разработали ученые.....	18
Скрытая водная сеть в почвах разрушается вспашкой и тяжёлой техникой .....	20
<b>Водные процессы и стресс-факторы .....</b>	<b>21</b>
Новая технология позволяет растениям «сообщать» о потребности в воде.....	21
Как мерзлая почва регулирует водные ресурсы в условиях глобального потепления .....	28
Управление изменчивостью осадков с помощью аккумулирующих резервуаров на фермах .....	32
<b>Технологии мониторинга и точного земледелия .....</b>	<b>36</b>
Технология на основе ИИ измеряет водный стресс виноградника с помощью одного снимка .....	36
Применение геостационарных спутников расширяется в сфере мониторинга земель .....	38

Искусственный интеллект и передовые сенсорные технологии выводят сельское хозяйство в новую эру точного земледелия.....	45
Фруктовые деревья между грядками увеличивают доход фермеров в несколько раз.....	51
<b>Практики и стратегии устойчивого агропроизводства .....</b>	<b>53</b>
Выбор сбалансированной стратегии .....	53
Циркулярная биоэкономика и устойчивое сельское хозяйство как факторы трансформации мирового агропроизводства.....	59
Дополнительный полив соленой водой повысил урожайность озимой пшеницы на Северо-Китайской равнине .....	64

# Биология растений и микробиота почв

## Древний кустарник, способный изменить будущее растительного белка<sup>1</sup>

Исследователи из Австралии изучают возможность использования выносливого пустынного растения для улучшения вкуса макаронных изделий и одновременного снижения содержания соли в продуктах питания. Местный кустарник, известный как «кенгуровый соляной куст» (одна из самых высоких разновидностей лебеды, достигающая до 3 метров и являющаяся ценным кормом для овец), потенциально может стать важным компонентом повседневного рациона.

Растение, также называемое *Atriplex nummularia*, произрастает в сухих и соленых районах Австралии. Как галофит, оно способно выживать в соленой почве, где многие другие сельскохозяйственные культуры не могут расти.

Коренные жители Австралии употребляют соляной куст в пищу на протяжении тысячелетий: они добавляют его листья в салаты или используют при приготовлении различных блюд. Кроме того, фермеры применяют его как корм для животных, учитывая его устойчивость к засухе.

Несмотря на многовековую историю использования, в современном пищевом производстве кенгуровый соляной куст пока используется в ограниченных количествах. Однако, как отмечают ученые, это может измениться в ближайшем будущем.

### Высокое содержание белка и клетчатки

Исследователи из Университета RMIT (Королевский технологический институт Мельбурна, Австралия) провели исследование соляного куста с целью определения его полной питательной ценности. Группа изучала порошок из соляного куста и оценивала его функциональные свойства при добавлении в макаронные изделия из пшеничной муки.

Результаты исследования показали, что соляной куст является богатым источником питательных веществ. Порошок растения содержит примерно 23,8% растительного белка и 29,9% пищевых волокон. Пищевые во-

---

<sup>1</sup> Источник: Sanjana Gajbhiye. Ancient shrub could reshape the future of plant-based protein / <https://www.earth.com/news/ancient-shrub-could-reshape-the-future-of-plant-based-protein/> Опубликовано 19.02.2026

локна способствуют пищеварению и поддерживают здоровье кишечника, тогда как белок необходим для строительства и восстановления мышечной ткани.

Кроме того, соляной куст содержит важные минералы, включая кальций, натрий, фосфор и цинк. Он также является источником биологически активных соединений, таких как фенольные соединения и антиоксиданты, которые помогают защитить организм от повреждений, вызванных свободными радикалами.

По словам первого автора исследования Самиддхи Гунатилоче, растение отличается особенно высоким содержанием белка для растительного источника, сопоставимого или даже превосходящего таковые у сои, горохового и рисового белка, что подчеркивает его потенциал как высококачественного растительного белка.

Аминокислотный состав соляного куста был оценен на 96,2, что указывает на то, что качество его белка практически соответствует идеальным потребностям человека. При этом добавление порошка растения в пшеничные продукты повышает уровень лизина. Поскольку пшеница содержит недостаточное количество лизина, использование соляного куста позволяет формировать более полноценный белковый профиль.

### **Соляной куст делает макаронные изделия более полезными для здоровья**

Для проверки влияния соляного куста на реальные продукты питания группа исследователей Университета RMIT добавила порошок растения в макаронные изделия из пшеничной муки. В эксперименте использовались различные концентрации порошка, включая 2,5% и 5%, при этом макаронные изделия сравнивались с добавлением соли и без нее.

По словам соавтора исследования, доктора Махсы Маджзуби, анализ показал, что порошок соляного куста содержит более чем в два раза больше белка и в восемь раз больше пищевых волокон, чем обычные макаронные изделия из пшеницы. Это означало, что одна порция макаронных изделий с добавлением порошка соляного куста обеспечивала почти половину рекомендуемой суточной нормы белка для взрослого человека.

Добавление 5% порошка также улучшило кулинарные характеристики макаронных изделий. Время приготовления увеличилось примерно на две минуты, однако выход готового продукта значительно повысился. В частности, выход при приготовлении достиг 221,5%, что свидетельствует о том, что макаронные изделия впитали больше воды и стали более объемными.

## **Стабильность в продуктах питания**

Исследование показало, что потери при приготовлении — то есть утрата питательных веществ и твердых частиц в воде во время варки — снизились с 9,0% до 3,9%. Этот результат свидетельствует о лучшей вододерживающей способности и более прочной структуре макаронных изделий с добавлением порошка соляного куста.

Порошок растения характеризуется высокой водопоглощающей способностью (287,4%) и маслопоглощающей способностью (151,8%), что способствует улучшению текстуры и стабильности пищевых продуктов.

Кроме того, макаронные изделия приобрели естественный зеленый цвет, который может повысить их визуальную привлекательность и привлечь потребителей, заинтересованных в необычных и полезных для здоровья продуктах.

## **Естественный способ снижения потребления соли**

Одним из наиболее значимых выводов исследования является возможность сокращения потребления натрия. Поскольку многие продукты питания содержат большое количество добавленной соли, их чрезмерное употребление может повышать риск развития гипертонии и сердечно-сосудистых заболеваний.

Исследователи отметили, что при добавлении 5% порошка соляного куста и исключении дополнительной соли содержание натрия в макаронных изделиях составило примерно 140 мг на 100 г. Это количество соответствует умеренному уровню натрия. Для сравнения, макаронные изделия с добавлением соли содержали около 1320 мг натрия на 100 г, что почти в десять раз больше.

## **Соляной куст улучшает белковый профиль**

Соляной куст естественным образом содержит натрий, что позволяет использовать его в качестве заменителя соли. Эта особенность делает растение ценным ингредиентом при разработке более здоровых продуктов без ущерба для вкуса.

По словам доктора Махсы Маджзуби, хотя бобовые традиционно считаются ценным источником незаменимых аминокислот, таких как лизин и триптофан, соляной куст оказался отличной альтернативой с высоким содержанием белка и значительным количеством незаменимых аминокислот, в частности лизина, которого обычно не хватает в пшеничных продуктах.

Она отметила, что смешивание пшеницы с порошком соляного куста предоставляет эффективную стратегию для создания продуктов с более полноценным белковым профилем.

### **Климатоустойчивое продовольствие**

Исследовательская группа Университета RMIT отмечает, что соляной куст может способствовать созданию более устойчивых и климатоустойчивых продовольственных систем.

Растение хорошо растет в сухих и соленых условиях, где многие другие сельскохозяйственные культуры не приживаются. С учётом того, что изменение климата усиливает засуху во многих регионах, такие культуры, как соляной куст, могут приобретать особую значимость.

Доктор Махса Маджзуби подчеркнула, что следующий этап исследований будет включать расширение применения соляного куста в других пищевых продуктах, таких как хлеб, закуски и растительные белковые продукты, а также проведение более масштабных сенсорных и потребительских испытаний. Она добавила, что планируется тесное сотрудничество с производителями и отраслевыми партнёрами для изучения возможностей устойчивого снабжения, оптимизации переработки и масштабирования.

По её словам, конечной целью является поддержка развития австралийских ингредиентов, устойчивых к климатическим изменениям, которые способствуют созданию более здоровых и устойчивых продовольственных систем.

Соляной куст демонстрирует, как древние знания и современная наука могут работать вместе: простой пустынный кустарник потенциально способен улучшить питание, снизить потребление соли и способствовать построению более устойчивого продовольственного будущего.

## Внесение удобрений может вредить полезным почвенным бактериям<sup>2</sup>

Закись азота, известная прежде всего как мощный парниковый газ и разрушитель озонового слоя, может играть неожиданную роль в жизни растений, напрямую влияя на здоровье их корневой системы.

Исследователи из Массачусетского технологического института обнаружили, что  $N_2O$  способен избирательно подавлять отдельные группы почвенных бактерий, изменяя микробный состав ризосферы — прикорневой зоны, критически важной для питания и защиты растений.

В лабораторных экспериментах газ нарушал синтез метионина у микроорганизмов, метаболизм которых зависит от витамина B12, тогда как бактерии с альтернативными биохимическими путями сохраняли устойчивость.

Анализ секвенированных геномов показал, что около 30 % бактерий потенциально уязвимы к такому воздействию. Учёные также подтвердили эффект в синтетических сообществах: микроорганизмы, продуцирующие собственную закись азота, подавляли рост чувствительных соседей.

В сельскохозяйственных почвах концентрация  $N_2O$  резко возрастает после внесения удобрений или обильных дождей, и такие пики могут приходиться на критические этапы формирования корневой микробиоты. Если гипотеза подтвердится в полевых условиях, управление выбросами закиси азота станет не только климатической, но и агрономической задачей: от сроков внесения удобрений может зависеть, какие именно микробы заселят корни и насколько эффективно они будут поддерживать рост культур.

---

<sup>2</sup> Источник: <https://www.gismeteo.ru/news/nature/vnesenie-udobrenij-mozhet-vredit-poleznym-pochvennym-bakteriyam/> Опубликовано 14.03.2026

## **Рост растений приостанавливается под воздействием стрессовых факторов и возобновляется при улучшении условий<sup>3</sup>**

Когда растения подвергаются воздействию внезапного похолодания, затопления солёной водой или других неблагоприятных условий, они прекращают рост в обычном режиме. Новое исследование, по сообщениям ученых, показывает, что растения действуют более «разумно»: временно приостанавливают рост, а затем возобновляют его, как только условия улучшаются. Исследователи из Университета Британской Колумбии (UBC) утверждают, что им удалось выявить ключевые гены и сигнальные пути, регулирующие этот процесс восстановления, который, по их словам, определяет, сможет ли растение оправиться или погибнет.

### **Растения, восстанавливающиеся после стресса**

Группа исследователей сосредоточила свои усилия на изучении процессов восстановления растений после стрессовых воздействий, вызванных низкими температурами и солевым воздействием — двумя распространёнными факторами, с которыми могут сталкиваться сельскохозяйственные культуры во время зимних штормов или при затоплении прибрежных полей. По их утверждению, понимание процессов восстановления, а не только выживания, может способствовать выведению сортов сельскохозяйственных культур, которые быстрее восстанавливаются и при этом продолжают давать урожай.

Первая автор статьи, аспирантка Университета Британской Колумбии Оливия Хэзелвуд, отметила, что в условиях изменения климата и учащения экстремальных погодных явлений эти исследования могут способствовать созданию климатоустойчивых культур, где генетически модифицированные растения восстанавливаются после стрессов быстрее и эффективнее. Она добавила, что такие растения смогут завершить полный жизненный цикл и дать урожай в сезон сбора, даже пережив снежные бури, высокие температуры или затопления.

---

<sup>3</sup> Источник: Andrei Ionescu. Plants pause growth during stress, then restart when conditions improve / <https://www.earth.com/news/plants-pause-growth-during-stress-then-restart-when-conditions-improve/>  
Опубликовано 12.03.2026

## **Растения могут приостанавливать свой рост**

В ходе своих экспериментов ученые наблюдали чёткий цикл «остановки и возобновления» роста растений. По их данным, при воздействии холода или высокой концентрации соли рост корней замедлялся или полностью прекращался. После устранения этих стрессовых факторов и предоставления растениям периода восстановления, равного по продолжительности воздействию стресса, рост корней возобновлялся.

Исследователи отмечают, что это особенно важно, поскольку корни играют ключевую роль в способности растения восстанавливаться. Если растение не может восстановить или сохранить свою корневую систему, оно теряет способность эффективно поглощать воду и питательные вещества, что негативно сказывается на всей надземной части растения.

По словам авторов, аналогичная логика восстановления проявляется и при других видах стресса. В одной из статей, представленных на рецензирование, они сообщают, что тепловой стресс протекает иначе: растения, по их наблюдениям, «ускоряют» рост во время высокой температуры, а затем «приостанавливают» его до снижения температуры.

Кроме того, исследователи фиксировали восстановление после осмотического стресса, связанного с засухой, однако этот процесс происходил более медленно. Старший автор исследования, доцент кафедры ботаники Университета Британской Колумбии Ариф Ашраф, отметил, что растения способны восстанавливаться после осмотического стресса, но на это требуется больше времени. По его словам, исследователи называют этот процесс «пауза и толчок», поскольку организму необходимо время, чтобы «прорваться» и восстановиться.

### **Что происходит внутри корневой системы»**

Чтобы выяснить механизмы, определяющие такое поведение растений — остановку и повторный запуск роста, — исследователи провели контролируемые лабораторные эксперименты. Они использовали модельное растение, подвергали его воздействию холода и солевого стресса, измеряли рост корней, а затем проверяли те же условия на двух диких травах, родственниках сельскохозяйственных культур. Когда все три вида продемонстрировали схожие реакции, исследователи предположили, что за этим процессом стоит общая клеточная система.

Поскольку рост корней зависит от деления клеток, Хэзелвуд решила изучить непосредственно клеточный цикл. Она применяла белки, мечен-

ные флуоресцентными маркерами, чтобы отслеживать активное деление клеток во время стрессовых воздействий и после них, а также присутствие ключевых белков, участвующих в делении клеток.

По её словам, после того как она в течение нескольких месяцев подсчитала тысячи клеток, оказалось, что при воздействии холода, засухи и солевого стресса содержание определённых белков в клетках снижалось, но уже примерно через 24 часа после возвращения растений в оптимальные условия их количество восстанавливалось. Таким образом, исследователи делают вывод, что эта «пауза» отражает не просто замедление роста, а реальное сокращение числа делящихся клеток, за которым следует достаточно быстрое восстановление, как только условия становятся благоприятными.

### **Ключевой ген, регулирующий восстановление роста**

Одним из ключевых участников этого процесса, по данным исследователей, является ген циклин-зависимой киназы A1 (CDKA1), который входит в состав механизма, обеспечивающего прохождение клеток через цикл деления. Учёные сообщили, что при ингибировании CDKA1 растения теряли способность нормально восстанавливаться после стрессовых воздействий. По их наблюдениям, это указывает на то, что возобновление роста не происходит автоматически, а требует повторного включения определённых молекулярных «переключателей».

Поскольку аналогичная реакция наблюдалась у нескольких видов растений, исследователи предполагают, что этот механизм, вероятно, является консервативным и может проявляться у многих сельскохозяйственных культур.

### **Значение генов, отвечающих за восстановление растений**

Большая часть исследований в растениеводстве, по мнению авторов, сосредоточена на устойчивости растений к экстремальным условиям: смогут ли они пережить высокие температуры, резкое похолодание или воздействие соли. В данном исследовании, как отмечают ученые, акцент делается на последующие процессы.

По их наблюдениям, растение может пережить стресс, но при этом потерять урожай, если оно не способно возобновить рост достаточно быстро, чтобы вовремя зацвести и дать плоды. Исследователи подчёркивают, что именно поэтому вопросы селекции и генной инженерии вызы-

вают большой интерес. Если удастся усилить генетические механизмы, отвечающие за восстановление растений, можно получить культуры, которые быстрее возвращаются к норме после экстремальных погодных явлений и при этом созревают в установленные сроки.

Старший автор исследования Ариф Ашраф отметил, что, хотя предотвратить жару или снежные бури невозможно, выявление генов, способствующих восстановлению после таких явлений, позволит растениям всё же давать урожай к сроку.

### **Что будет дальше**

Следующей целью группы исследователей является демонстрация того, что аналогичный процесс восстановления наблюдается и у реальных канадских сельскохозяйственных культур, включая сорта пшеницы. Хэзелвуд отметила, что они намерены перейти от лабораторных моделей и диких трав к культурам, имеющим непосредственное значение для продовольственных систем.

По её словам, в течение двух-трёх лет они надеются скорректировать генетику этих канадских сортов и создать собственные линии, модифицированные с помощью CRISPR, которые будут лучше приспосабливаться к изменяющемуся климату. Исследователи считают, что в случае успеха это может привести к разработке нового подхода к обеспечению климатической устойчивости в сельском хозяйстве. По их мнению, речь идёт не просто о растениях, способных переживать стресс, а о растениях, которые «знают», когда необходимо сделать паузу и как достаточно быстро возобновить рост для завершения жизненного цикла и получения урожая.

## **Разработан метод защиты растений от болезней и засухи с помощью веществ из перегноя<sup>4</sup>**

Российские ученые разработали биотехнологический метод защиты сельскохозяйственных растений от болезней и засухи с помощью гуминовых кислот, получаемых из перегноя. Об этом ТАСС сообщили в Минобрнауки РФ.

---

<sup>4</sup> Источник: <https://tass.ru/nauka/26891705> Опубликовано 26.03.2026

«Ученые Института фундаментальной биологии и биотехнологии Сибирского федерального университета использовали гуминовые кислоты для развития у сельскохозяйственных растений механизмов адаптации к заболеваниям и засухам. Добавляя наночастицы гуминовых кислот, получаемых из биологических остатков растений (перегноя), в процессе проращивания семян, биотехнологи также добились нейтрализации частиц тяжёлых металлов и не позволили им повредить растения», - сообщили в ведомстве.

Отмечается, что гуминовые кислоты широко распространены в природе и обладают способностью связывать тяжелые металлы, радионуклиды и токсины, а также имеют высокую способность к удержанию воды.

Как сообщила ТАСС руководитель исследования, доктор биологических наук, профессор кафедры медицинской биологии СФУ Екатерина Кесслер, опыты проводились на морозостойких, адаптированных для Сибири сортах пшеницы. «Сравнив проростки зерновых из контрольной группы, в которой семена замачивались в обычной дистиллированной воде и затем подвергались «атаке» частицами меди, с проростками из зерен, предварительно обработанных раствором с гуминовыми кислотами, мы увидели существенную разницу в цитогенотоксичности. Клетки растений, семена которых прорастали в присутствии наночастиц гуминовых кислот, не имели нарушений в процессе митоза - их клетки делились правильно. Был заложен здоровый «базис», на котором растение будет благополучно развиваться дальше. В то же время, растения, прораставшие без присутствия наночастиц гуминовых кислот, имели патологии в клетках - их процесс деления был нарушен проникновением меди», - рассказала она.

Ученые отмечают, что эффект от замачивания в растворе гуминовых кислот будет распространяться на любые сельскохозяйственные растения, в том числе, популярные на приусадебных участках - огурцы, помидоры, болгарский перец, цветочные культуры. Надо отметить что использованные природные соединения в целом безопаснее, большинства химически синтезированных веществ используемых для протравливания семян.

Проведенное исследование полностью вписывается в национальный проект «Технологическое обеспечение биоэкономики» и является основой для развития зеленых биотехнологий, добавили в университете.

СФУ - первый в России федеральный университет, который был основан в 2006 году путем объединения четырех вузов в Красноярске.

## **Засуха усиливает устойчивость бактерий к антибиотикам – тревожный вывод ученых<sup>5</sup>**

Засуха может не только высушивать почву, но и усиливать опасные бактерии. Новое исследование показало, что в сухих условиях микроорганизмы быстрее приобретают устойчивость к антибиотикам – и эта устойчивость может передаваться патогенам, опасным для человека.

Почва – это поле постоянной «микробной войны». Бактерии вырабатывают антибиотики, чтобы подавлять конкурентов, а те, в свою очередь, учатся выживать. В нормальных условиях этот баланс относительно стабилен.

Но при засухе ситуация меняется. Влага испаряется, и концентрация природных антибиотиков в почве растет. В таких условиях выживают только самые устойчивые микроорганизмы – остальные просто исчезают. В результате доля «суперустойчивых» бактерий резко увеличивается.

### **От почвы – к больницам**

Самое тревожное открытие связано с генами устойчивости. Ученые обнаружили, что многие из них совпадают с теми, что находят у опасных бактерий в больницах.

Причина – в способности микробов обмениваться генетической информацией. Этот процесс позволяет бактериям буквально «делиться» устойчивостью друг с другом. И если такие гены появляются в почве, со временем они могут попасть и к патогенам, заражающим людей.

Анализ данных, опубликованный журнале *Nature Microbiology*, показал прямую связь: чем суше регион, тем чаще в местных больницах фиксируют устойчивые к антибиотикам инфекции.

### **Глобальная проблема, которая уже рядом**

Резистентность к антибиотикам уже считается одной из главных угроз здравоохранению. По оценкам экспертов, она ежегодно становится причиной более миллиона смертей и косвенно связана с несколькими миллионами случаев.

---

<sup>5</sup> Источник: <https://www.techinsider.ru/news/news-1730015-zasuha-usilivaet-ustoichivost-bakterii-k-antibiotikam-trevojnyi-vyvod-uchenyh/> Опубликовано 25.03.2026

Новое исследование добавляет к этой проблеме климатический фактор. По мере потепления и увеличения засушливых зон ситуация может только ухудшаться. Причем это касается всех регионов: бактерии не знают границ и распространяются очень быстро.

### **Что можно сделать**

Полностью остановить процесс невозможно, но его можно замедлить. Ученые указывают на несколько направлений:

- развитие быстрых диагностических тестов;
- более точное применение антибиотиков;
- использование комбинированных терапий;
- и главное – поддержка исследований новых лекарств.

Также важную роль играет борьба с изменением климата: чем меньше экстремальных засух, тем слабее давление, которое «закаляет» бактерии.

## **Ученые нашли ген, который заставит корни зерновых «бурить» землю в поисках воды<sup>6</sup>**

Тысячи лет человек смотрел только на то, что растет над землей. Селекционеры отбирали самые крупные зерна и пышные колосья, забывая про «фундамент» растения — его корни. Теперь ученые из Австралии заявляют: из-за этого однобокого подхода без внимания остались многие полезные гены, которые могли бы спасти урожай в засуху.

Исследователи из Университета Квинсленда решили исправить эту историческую несправедливость и заглянуть под землю. Там они обнаружили настоящий «пульт управления» корнями — ген CEP1. Оказалось, что он отвечает за архитектуру корневой системы почти у всех зерновых культур.

---

<sup>6</sup> Источник: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/novosti-nauki/uchenye-nashli-gen-kotoryi-zastavit-korni-zernovyh-burit-zemlyu-v-poiskah-vody.html> Опубликовано 9.04.2026

Ученые поняли, что, воздействуя на этот ген, можно перепрограммировать корни. Вместо того чтобы расти вширь, они начнут уходить вглубь — круто и узко, словно живые буры. Это позволит растениям доставать воду и питательные вещества из глубоких слоев почвы, которые раньше были недостижимы, выживать в экстремально сухом климате без потери урожайности и эффективнее использовать удобрения, не давая им вымываться. Результаты исследования опубликованы в журнале *Journal of Experimental Botany*.

Ричард Диксон, аспирант Университета Квинсленда, который работал над исследованием вместе с учеными из Австралийского национального университета, заявил: «Наша цель — использовать биотехнологии для создания растения с крутым, глубоким корневым строением, способного получать доступ к воде и питательным веществам в сложных условиях без существенного снижения урожайности. Мы считаем, что огромное количество генетического разнообразия было утрачено, потому что мы отбирали растения только по признакам, проявляющимся над землей».

«Преыдущие исследования нашей группы с использованием растения *Arabidopsis*, своего рода лабораторной крысы для исследований в области генетики растений, показали, что ген *CEPR1* контролирует форму корневой системы и некоторые надземные признаки, такие как образование семян. В этом исследовании мы модифицировали растения *Arabidopsis*, чтобы получить версии гена *CEPR1*, обнаруженные в ячмене, рисе и кукурузе, и проверить, функционируют ли они аналогично. Было высказано предположение, что форма корневой системы может быть адаптирована к различным сценариям выращивания сельскохозяйственных культур и условиям окружающей среды, что позволит более эффективно использовать ресурсы», — говорит исследователь из Австралийского национального университета и соавтор исследования доктор Майкл Талески.

Как отмечают исследователи, результаты обнадеживают, поскольку они указывают на то, что генетический путь *CEPR1* является перспективной мишенью для оптимизации корневых систем зерновых культур.

Диксон заявил, что, хотя первоначальная работа с геном многообещающая, существуют ограничения, которые необходимо будет устранить в ходе дальнейших исследований: «У ячменя отключение гена *CEPR1* привело к снижению урожайности и появлению более крутых и узких корневых систем, как и у мутантов *Arabidopsis*. Мы также выращивали и собирали урожай генетически отредактированных растений в полевых условиях, чтобы подтвердить результаты, полученные в теплице, и сейчас занимаемся анализом данных».

Ученые намерены точно настроить этот сигнальный путь, а не просто отключить ген, чтобы создать корневые системы, способные достигать более глубоких слоев воды или питательных веществ, не влияя при этом на урожайность зерна.

Для этого они изучают возможность создания более глубоких корневых систем путем сочетания гена *CEPR1* с другим целевым геном. Для сканирования корней они используют высокотехнологичные установки, созданные Международной научно-исследовательской группой (IRTG) Университета Квинсленда.

Исследование является частью проекта ARC Linkage, реализованного в сотрудничестве с компанией InterGrain.

## **Сенсорную систему, предупреждающую о засолении почвы, разработали ученые<sup>7</sup>**

Группа исследователей под руководством ученых из Университета штата Пенсильвания разработала недорогую сенсорную систему, чтобы помочь фермерам выявлять и устранять последствия солевого стресса у растений.

Принцип работы датчика заключается в обнаружении определенных газов, так называемых летучих органических соединений, выделяемых растениями. Исследователи сообщили, что растения, испытывающие солевой стресс, выделяют другие газы, чем здоровые растения, и их сенсорная система может уловить эту разницу. Результаты исследования были опубликованы в журнале *IEEE Sensors Journal*.

Разработанная нами недорогая сенсорная система улавливает летучие органические соединения, выделяемые растениями в стрессовых условиях. Представьте, что это электронный «нос» для сельскохозяйственных культур, который «чувствует» газы, выделяемые растениями в состоянии стресса, и может предупредить фермеров о засолении почвы до того, как появятся видимые повреждения,- сказал соавтор исследования Франческо Ди Джоя.

Первый автор исследования Али Ахмад, исследователь и аспирант Политехнического университета Валенсии в Испании, проводил это исследование на рукколе, которая была выращена в гидропонной теплице.

---

<sup>7</sup> Источник: <https://glavagronom.ru/news/sensornuyu-sistemu-preduprezhdayushchuyu-o-zasolenii-pochvy-razrabotali-uchenye> Опубликовано 26.03.2026

Для эксперимента мы использовали гидропонную систему, чтобы контролировать уровень солёности и исключить другие факторы. Мы хотели убедиться, что различия в летучих веществах растений обусловлены разницей в уровне солёности,- сказал Ахмад.

Исследователи вызвали солевой стресс у растений, добавив в питательные растворы, которыми они поливали растения, разное количество хлорида натрия, чтобы создать две группы: с умеренным и сильным стрессом. Третья группа растений – контрольная не подвергалась воздействию соли. Растения поместили в купольные камеры, которые улавливали выделяемые ими газы и измеряли их с помощью недорогих газовых датчиков, установленных в верхней части куполов. Эти датчики в течение восьми дней измеряли изменения в химическом составе воздуха, вызванные летучими органическими соединениями, выделяемыми растениями.

Мы изучали металлооксидно-полупроводниковые датчики, потому что они маленькие, их легко устанавливать, они широко доступны в интернете и стоят недорого – некоторые из них стоят меньше доллара.

Это значит, что фермеры потенциально могут установить множество датчиков по всему полю. Но прежде чем они станут основным инструментом точного земледелия, необходимо усовершенствовать аппаратное обеспечение датчиков и их сети,- сказал Ахмад.

Чтобы подтвердить точность сенсорной системы, исследователи измерили физические характеристики растений, такие как рост, состояние листьев и физиологические реакции, и выяснили, что сенсорная сеть с точностью до 99,15% определяет уровень стресса у растений. Растения, подвергшиеся солевому стрессу, со временем демонстрировали видимые признаки ухудшения состояния.

Исследование Ди Джойи, Ахмада и их коллег предполагает, что те же недорогие газовые датчики, которые использовались в недавнем исследовании солевого стресса, могут обнаруживать летучие органические соединения, выделяемые здоровыми, больными и испытывающими стресс растениями, которые страдают от засухи, болезней и вредителей.

## **Скрытая водная сеть в почвах разрушается вспашкой и тяжёлой техникой<sup>8</sup>**

Исследователи из Китайской академии наук и Университета Харпер-Адамс использовали оптоволоконные кабели на экспериментальном поле, чтобы отслеживать движение воды в реальном времени. В нетронутой почве вода уходила вглубь и сохранялась там. В почве, уплотнённой техникой или подвергшейся глубокой вспашке, вода оставалась у поверхности и быстро испарялась.

Уплотнение и обработка разрушают капиллярную структуру пор. В результате почва теряет способность смягчать последствия экстремальных осадков. Фермеры сталкиваются с двойной проблемой: затоплением после ливня и засухой уже через неделю. Волоконная оптика позволяет наблюдать процессы под землёй, не нарушая структуру почвы.

Для климата это напоминание: почва — не просто среда для корней. Это система, которая либо работает, либо нет. В эпоху учащающихся ливней и засух выбор становится решающим. Почва, которая не удерживает воду, делает любой урожай уязвимым. Почва, которая удерживает, даёт время. А время в сельском хозяйстве — это всё.

---

<sup>8</sup> Источник: <https://www.gismeteo.ru/news/nature/skrytaya-vodnaya-set-v-pochvah-razrushaetsya-vspashkoj-i-tyazhjoloj-tehnikoj/> Опубликовано 25.03.2026

## Водные процессы и стресс-факторы

### Новая технология позволяет растениям «сообщать» о потребности в воде<sup>9</sup>

По всей сельскохозяйственной территории США фермеры сталкиваются с одной из ключевых проблем современного земледелия — обеспечением культур оптимальным количеством воды и азота. Недостаток этих ресурсов может негативно сказаться на урожайности, тогда как их избыточное применение приводит к росту производственных затрат, вымыванию питательных веществ в реки и загрязнению грунтовых вод. Несмотря на осознание важности поддержания такого баланса, определение «идеального» уровня традиционно основывалось на практическом опыте, предположениях и погодных условиях.

Исследовательская группа из Университета Джорджии, Университета штата Айова и Университета Небраски — Линкольн при финансовой поддержке Национального института продовольствия и сельского хозяйства (*NIFA*) Министерства сельского хозяйства США разрабатывает технологию, способную изменить существующий подход. Ученые разрабатывают новый сельскохозяйственный инструмент, объединяющий миниатюрные датчики, простое аппаратное обеспечение, специализированное программное обеспечение и методы машинного обучения. Разрабатываемая система предназначена для мониторинга состояния растений и почвы в режиме реального времени и предоставления фермерам точных рекомендаций о том, когда и где следует проводить орошение или вносить удобрения.

Руководитель национальной программы *NIFA* Kelly Garbach отметила, что сотрудничество ученых, инженеров и производителей позволяет создавать практические инструменты, способствующие укреплению продовольственной безопасности, защите водных ресурсов и снижению затрат фермерских хозяйств. По ее словам, данный проект демонстрирует, каким образом использование данных в режиме реального времени может помочь в решении наиболее сложных задач сельского хозяйства.

Ожидается, что разработка будет способствовать не только повышению эффективности выращивания сельскохозяйственных культур, но и защите источников питьевой воды, сокращению выбросов парниковых га-

---

<sup>9</sup> Источник: Lori Tyler Gula. New Technology Lets Plants Tell Farmers When They Are Thirsty / <https://www.nifa.usda.gov/about-nifa/impacts/new-technology-lets-plants-tell-farmers-when-they-are-thirsty>  
Опубликовано 9.02.2026

зов и снижению производственных затрат — особенно в условиях усиливающегося финансового давления на фермерские хозяйства.

Ведущий исследователь проекта Лян Дун, профессор и выдающийся ученый Университета Джорджии, а также член Альянса исследовательских организаций штата Джорджия (Georgia Research Alliance), подчеркнул, что разработанная система позволяет сделать потребности растений более наглядными и управляемыми. По его словам, точное понимание потребностей культур дает фермерам возможность поддерживать высокую продуктивность, одновременно снижая объем используемых ресурсов.

### **Почему даже небольшие избыточные количества азота имеют значение**

Большинство фермеров применяют больше азотных удобрений и воды, чем фактически требуется выращиваемым культурам. Такая практика объясняется высокой степенью неопределенности в сельском хозяйстве, где производители стремятся минимизировать риск потери урожая. Однако подобная стратегия «страхования» сопряжена со значительными экологическими и экономическими издержками.

Избыточные объемы азота могут попадать в реки и водоемы, способствуя цветению водорослей, что представляет угрозу для экосистем и источников питьевой воды. Чрезмерное использование водных ресурсов, в свою очередь, приводит к истощению подземных водоносных горизонтов, которые играют важную роль в обеспечении водой городов, природных экосистем и будущих сельскохозяйственных хозяйств. Кроме того, каждый дополнительный галлон воды или фунт удобрений увеличивает финансовую нагрузку на фермерские хозяйства. Проблема усугубляется в условиях изменения климатических условий, сопровождающихся более частыми сильными ливнями и периодами экстремальной летней жары. Интенсивные осадки могут способствовать вымыванию удобрений из почвы, тогда как повышенные температуры усиливают тепловой стресс растений и увеличивают их потребность в воде.

В ответ на эти вызовы исследовательская группа поставила перед собой задачу предоставить фермерам новые инструменты для принятия решений. Основная цель проекта заключается в получении данных в режиме реального времени о состоянии листьев, стеблей растений и почвы. Предполагается, что такая информация позволит фермерам более точно определять время, место и объем орошения и внесения удобрений.

## Датчики, позволяющие фиксировать «сигналы» растений

Для достижения поставленной цели исследовательская группа разработала серию миниатюрных датчиков, многие из которых имеют настолько небольшие размеры, что могут помещаться на кончике пальца. Часть устройств крепится непосредственно к листьям растений, другие устанавливаются в стеблях, тогда как отдельные датчики размещаются в почве.

Один из разработанных типов представляет собой гибкий сенсор, который прикрепляется к поверхности листа и по внешнему виду напоминает временную татуировку. Такой датчик фиксирует показатели влажности, температуры и биоэлектрические сигналы растения. Эти сигналы рассматриваются как своего рода физиологические индикаторы, отражающие состояние растения. Их анализ позволяет определить, насколько активно растение регулирует свою температуру и с какой интенсивностью происходит транспирация — процесс испарения воды через листья.

Другой тип устройства — микроигльчатый датчик, который вводится в стебель растения и предназначен для измерения концентрации нитратов внутри тканей. Получаемые данные позволяют оценить, насколько эффективно растение усваивает азот и не начинают ли его внутренние запасы снижаться.

Почвенные датчики имеют компактную форму и внешне напоминают небольшие спички. Они измеряют концентрацию нитратов в почве, а также водный потенциал почвы. Такая информация позволяет определить, какое количество влаги почва способна удерживать, и насколько легко корневая система растений может получать доступ к воде. Для обеспечения стабильности измерений используется пористый материал, который способствует переносу небольших количеств почвенной влаги к поверхности датчика, что позволяет получать достоверные данные даже в условиях засухи.

Стоимость изготовления каждого устройства составляет всего несколько долларов. Энергоснабжение обеспечивается небольшой солнечной панелью, заряжающей аккумулятор, тогда как радиопередатчик малой мощности передает собранные данные на ближайший шлюз, подключенный к сети Интернет. Система обновляет показания каждые несколько минут, обеспечивая постоянный поток информации. Низкая стоимость разработки была предусмотрена разработчиками изначально. Использование доступных материалов и открытого программного обеспечения делает возможным применение таких инструментов как на крупных коммерческих фермах, так и в небольших семейных хозяйствах.

## Преобразование измерений в практические рекомендации

Сбор данных приобретает практическую ценность лишь в том случае, если полученную информацию можно преобразовать в конкретные рекомендации для принятия решений. С этой целью исследовательская группа разработала цифровую аналитическую систему, предназначенную для обработки и интерпретации данных, поступающих от датчиков.

Показания сенсоров интегрируются с изображениями, полученными с беспилотных летательных аппаратов, спутниковыми данными и валидированной моделью роста сельскохозяйственных культур. На основе методов машинного обучения эти разнородные источники информации объединяются в так называемый «цифровой двойник» сельскохозяйственного поля — динамическую модель, отражающую текущее состояние посевов и обновляемую в течение дня.

Если цифровая модель фиксирует потенциальную проблему, система автоматически формирует предупреждение. Например, в случае, когда в период высокой температуры листья растений в определенной части поля начинают перегреваться, система может рекомендовать проведение целевого орошения. Аналогичным образом, если концентрация нитратов в почве снижается ниже оптимального уровня лишь в отдельных зонах системы центрального орошения, платформа предлагает внести дополнительное количество азота только в этих участках. Такой подход позволяет отказаться от обработки всего поля и сосредоточить вмешательство исключительно на тех зонах, где это действительно необходимо.

Моделирование показывает, что применение подобной стратегии позволяет сохранять стабильную урожайность при одновременном значительном сокращении потребления воды и удобрений.

В ходе полевых испытаний, проведенных в штатах Айова, и Небраска, около двух третей листовых датчиков обеспечивали стабильное получение полезных данных на протяжении более двух месяцев. Устройства успешно функционировали в условиях сильных ливней, порывистого ветра и интенсивного солнечного излучения. Почвенные датчики также продемонстрировали удовлетворительные результаты, хотя примерно четверть из них подверглась перегреву. Полученные в ходе испытаний данные позволили инженерам усовершенствовать конструкцию устройств, в частности переработать отдельные компоненты и внедрить энергосберегающие режимы работы. Эти изменения способствовали увеличению срока службы батарей и повышению стабильности работы датчиков в течение более продолжительных периодов времени.

## **Результаты, выходящие за пределы сельскохозяйственных хозяйств**

Сокращение избыточного использования удобрений и воды для орошения приносит преимущества не только самим фермерским хозяйствам, но и более широким сообществам.

Среди ключевых положительных эффектов можно выделить несколько направлений.

- Снижение объема азотных стоков способствует улучшению качества водных ресурсов. Меньшее поступление азота в водоемы уменьшает вероятность интенсивного цветения водорослей и способствует повышению безопасности источников питьевой воды, особенно в сельских районах.
- Более точное применение удобрений позволяет сократить выбросы закиси азота — одного из наиболее мощных парниковых газов. Использование только того количества азота, которое действительно необходимо растениям, способствует уменьшению негативного воздействия сельского хозяйства на климатическую систему.
- Снижение потребления воды способствует сохранению подземных водных ресурсов. Это имеет важное значение для обеспечения водоснабжения городов, поддержания природных экосистем и долгосрочной устойчивости сельскохозяйственного производства.
- Повышение эффективности использования ресурсов позволяет снизить производственные затраты фермерских хозяйств. Удобрения, топливо и вода относятся к основным статьям расходов в сельском хозяйстве, поэтому их более рациональное применение помогает фермерам сохранять экономическую устойчивость в условиях неблагоприятных погодных условий и нестабильности рынков.

Ведущий исследователь проекта Лян Дун подчеркнул, что данные эффекты имеют более широкое значение. По его словам, вода и азот относятся к числу наиболее дорогостоящих и экологически значимых ресурсов, используемых в сельском хозяйстве. Он отметил, что более точное и рациональное их использование приносит выгоду не только самим производителям, но и потребителям, а также сообществам, расположенным ниже по течению водных систем.

## **Разработка, ориентированная на практическое применение**

Для широкого внедрения новой технологии она должна быть экономически доступной и удобной в использовании. Исследовательская группа изначально проектировала систему с учетом этих практических требований.

В конструкции датчиков используются недорогие полимерные материалы и стандартные микрочипы. Запасные компоненты имеют компактные размеры и могут храниться непосредственно в фермерской технике. Получаемые данные отображаются на простой панели управления, доступной через смартфон. Энергоснабжение системы обеспечивается за счет солнечных панелей, что позволяет использовать ее даже в удаленных сельскохозяйственных районах.

Разработанная платформа предназначена для поддержки фермеров в принятии решений, а не для замены их профессионального опыта. В штатах Айова и Небраска специалисты консультационных служб сельского хозяйства проводят полевые демонстрационные мероприятия, в рамках которых фермеры могут тестировать датчики, наблюдать данные мониторинга в режиме реального времени и анализировать различные сценарии использования системы. Получаемая обратная связь используется разработчиками для совершенствования интерфейса платформы, в частности для оптимизации системы предупреждений и рекомендаций с учетом реальных рабочих процессов на фермах — например, времени, необходимого для перемещения оросительного оборудования или планирования внесения удобрений.

Ведущий исследователь проекта Лян Дун отметил, что предлагаемая система позволяет перейти от эпизодических наблюдений к непрерывному мониторингу состояния сельскохозяйственных культур. По его словам, понимание процессов, происходящих с растениями в режиме реального времени, дает фермерам возможность принимать более обоснованные решения как для повышения эффективности производства, так и для снижения воздействия на окружающую среду.

## **Подготовка нового поколения специалистов**

Еще одним важным результатом проекта является вклад в подготовку нового поколения инженеров, ученых и специалистов в области сельского хозяйства.

В ходе реализации проекта студенты принимали активное участие в различных этапах исследовательской и инженерной работы. Они участвовали в проектировании электронных схем, разработке и сборке датчиков, установке оборудования, создании программного обеспечения, а также в анализе многолетних массивов данных. Полученный опыт позволил многим выпускникам продолжить профессиональную карьеру в высокотехнологичных компаниях и стартапах, специализирующихся на разработке сенсорных технологий и цифровых решений для сельского хозяйства.

## **Планы на будущее**

Исследовательская группа планирует провести тестирование полной системы на коммерческих фермах в следующем сезоне. Фермеры, участвующие в проекте, смогут использовать интерактивные карты, отображающие уровень водного стресса и содержание питательных веществ в различных участках поля. Кроме того, им будут предоставлены отчеты с рекомендациями, которые можно будет проанализировать в процессе сбора урожая.

Работа над совершенствованием датчиков продолжается. Ученые стремятся сделать их более селективными к определенным ионам питательных веществ и повысить их прочность. Проводится также исследование возможностей сотрудничества с промышленностью для стандартизации производства, что позволит сделать устройства более долговечными, доступными и простыми в калибровке. Планируется интеграция системы с существующим сельскохозяйственным оборудованием, что должно способствовать более широкому внедрению технологии.

Руководитель национальной программы *NIFA* Kelly Garbach подчеркнула, что точное использование ресурсов позволяет фермерам удовлетворять потребности своих культур, одновременно сохраняя природные ресурсы, поддерживая сельскую экономику и укрепляя устойчивость целых сообществ. По ее словам, этот проект демонстрирует, как государственные исследования, финансируемые *NIFA*, могут приносить пользу далеко за пределами сельского хозяйства.

## Как мерзлая почва регулирует водные ресурсы в условиях глобального потепления<sup>10</sup>

Мерзлая почва действует как скрытая подземная плотина. По мере ее оттаивания изменяются русла рек, что приводит к трансформации водных потоков, водно-болотных угодий, экосистем и инфраструктуры в холодных регионах.

Мерзлая почва покрывает около 20% земной поверхности и выполняет роль сезонной или долговременной подземной плотины, регулируя движение воды и хранение углерода. В новой статье в журнале *Review of Geophysics* рассматриваются последние достижения в изучении физики, наблюдения и моделирования гидрологии мерзлой почвы. Мы попросили ведущего автора дать обзор текущего состояния знаний о мерзлой почве, прогнозов влияния изменения климата на нее и ключевых направлений будущих исследований.

### **Примерно какая часть поверхности Земли покрыта мерзлой почвой и где она встречается?**

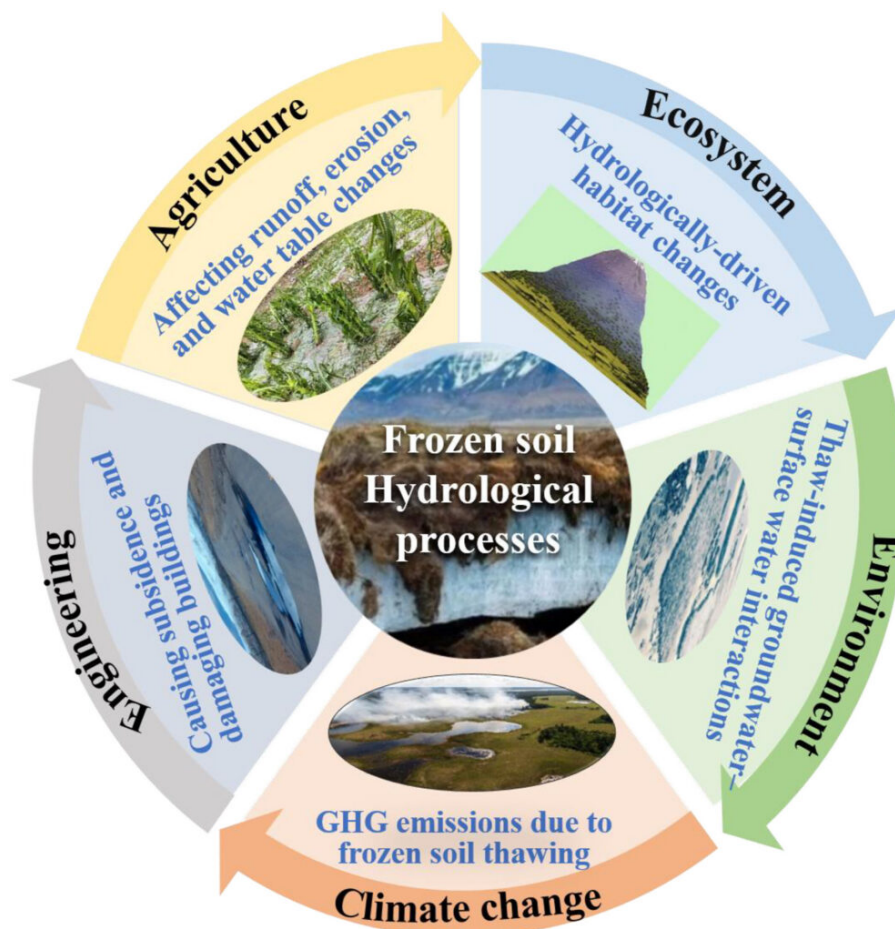
Мерзлая почва включает как вечную мерзлоту, которая остается замерзшей как минимум два года подряд, так и сезонно мерзлую землю, которая замерзает и оттаивает каждый год. В совокупности эти мерзлые ландшафты занимают примерно пятую часть земной поверхности и охватывают большую часть Северного полушария. Вечная мерзлота распространена в арктических и субарктических регионах, таких как Аляска, северная Канада, Сибирь и Гренландия, а также встречается в высокогорных и платообразных районах, включая Цинхай-Тибетское плато. Сезонно мерзлая земля простирается значительно дальше на юг, охватывая умеренные регионы. Хотя мерзлая почва часто ассоциируется с удаленной тундрой, она также встречается в местах, где люди живут, работают, занимаются сельским хозяйством и строят инфраструктуру, что делает ее важной далеко за пределами Арктики.

---

<sup>10</sup> Источник: Ying Zhao. How Frozen Ground Controls Water in a Warming World / <https://eos.org/editors-vox/how-frozen-ground-controls-water-in-a-warming-world> Опубликовано 17.03.2026

## Почему важно понимать гидрологию мерзлой почвы?

Замерзшая почва оказывает значительное влияние на движение воды, зоны её накопления и моменты высвобождения. Во многих холодных регионах она функционирует как сезонная или долговременная подземная плотина. При замерзании почвы лед может блокировать поры, ограничивать инфильтрацию и заставлять талую воду перемещаться по поверхности в поперечном направлении, что может приводить к увеличению весеннего стока, эрозии и наводнениям. По мере углубления оттаивания открываются новые пути для движения воды, что способствует большому пополнению запасов, усилению связи с подземными водами и более высокому базовому стоку в холодное время года.



*Повторные замерзания и оттаивания почвы изменяют движение воды и устойчивость грунта, влияя на растительность, урожайность сельскохозяйственных культур, функционирование инфраструктуры и экологические процессы*

Эти процессы влияют на реки, озера, водно-болотные угодья, качество воды, экосистемы и инфраструктуру. Поэтому понимание гидрологии мерзлой почвы имеет ключевое значение для прогнозирования изменений водных ресурсов и состояния окружающей среды в холодных регионах в условиях продолжающегося потепления.

### **Почему необходимо изучать мерзлые почвы с помощью междисциплинарного подхода**

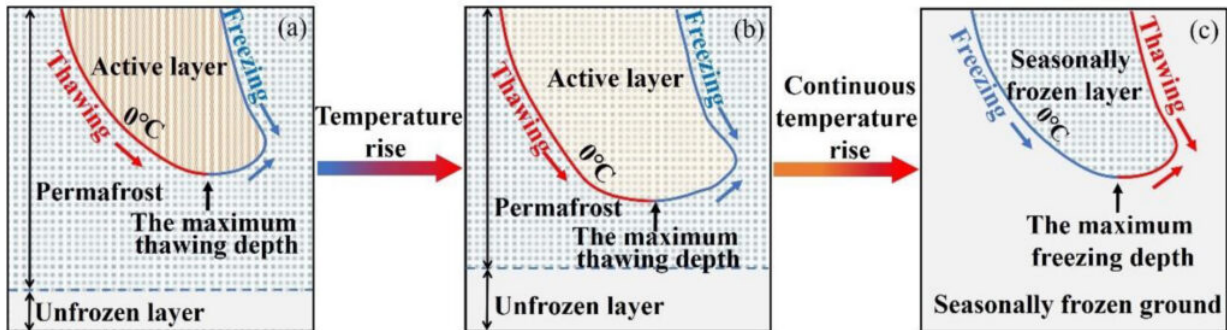
Гидрологию мерзлых почв невозможно полностью понять, опираясь только на традиционные методы гидрологии. Просачивание воды, сток и движение через подземные слои зависят от взаимодействия физических свойств почвы, теплопередачи, растительности, снега, подземных вод, геохимии, экологии и инженерных факторов. Оттепель влияет не только на речной сток и пополнение подземных вод, но и на выброс углерода, перенос питательных веществ, развитие водно-болотных угодий и стабильность инфраструктуры. Поэтому наблюдения должны сочетать полевые измерения, геофизику, дистанционное зондирование и моделирование на разных масштабах.

Междисциплинарный подход позволяет связать процессы замерзания и оттаивания на уровне пор с реакцией ландшафта и водосборного бассейна, а также оценить гидрологические изменения в контексте их более широкого воздействия на экосистемы, климатические обратные связи и общество.

### **Как изменение климата повлияет на мерзлую почву в ближайшие годы?**

Глобальное потепление уже сокращает площадь и продолжительность мерзлой почвы во многих регионах. В районах вечной мерзлоты активный слой становится толще, а в некоторых местах под озерами, реками и оттаявшими почвами формируются круглогодично незамерзшие зоны, известные как талики. В регионах с сезонным замерзанием периоды замерзания становятся короче и менее стабильными. Эти изменения могут приводить к увлажнению или высыханию ландшафтов в зависимости от топографии, содержания подземного льда и подземной связности. В некоторых арктических низменностях оттепель способствует образованию луж, расширению водно-болотных угодий и усилению зимнего стока. В других регионах, особенно в некоторых горных и платообразных районах, более глубокое оттаивание может увеличить дренаж и уменьшить влажность

почвы вблизи поверхности. Таким образом, гидрологическая реакция мерзлой почвы широко распространена, но весьма изменчива, отражая сложное взаимодействие поверхностных и подземных водных процессов.



*С повышением температуры мерзлая почва начинает оттаивать сверху вниз. Углубляющийся слой оттаивания позволяет воде свободнее перемещаться в почве, изменяя связи между подземными водами*

### **Какие недавние достижения способствовали улучшению нашего понимания гидрологии мерзлой почвы**

Последние достижения значительно углубили наше понимание гидрологии мерзлых почв. В полевых условиях современные датчики теперь позволяют измерять температуру почвы, влажность, глубину оттаивания и потоки газов с высоким пространственно-временным разрешением. Волоконно-оптические системы, дроны и геофизические методы помогают расширить эти наблюдения на большие территории. Спутниковые данные фиксируют переходы от замерзания к оттаиванию, изменения поверхностных вод и деформацию земной поверхности, связанную с оттаиванием. В то же время модели лучше учитывают фазовые переходы, наличие незамерзшей воды, преимущественные потоки, взаимодействие подземных вод с вечной мерзлотой и процессы резкого оттаивания. Эти достижения позволяют исследователям связывать процессы замерзания и оттаивания на малых масштабах с гидрологическими реакциями на уровне водосборных бассейнов и регионов, что имеет ключевое значение для прогнозирования будущей гидрологии холодных регионов в условиях изменения климата.

## **Направления будущих исследований**

Наш обзор выделил несколько приоритетных направлений для будущих исследований. Во-первых, необходимо более тесное объединение изучения процессов, наблюдений и моделирования, чтобы физика замерзания и оттаивания на уровне пор могла быть реалистично представлена на масштабах водосборных бассейнов и земной системы.

Во-вторых, требуется дополнительное исследование порогового поведения, резкого оттаивания, взаимосвязи подземных вод и изменений сезонности речного стока.

В-третьих, гидрология мерзлых почв должна быть более тесно интегрирована с круговоротом углерода, экологией и рисками для инфраструктуры, поскольку оттаивание одновременно влияет на все эти аспекты.

Более эффективные долгосрочные сети мониторинга, унифицированные наборы данных и интегрированные подходы — сочетание полевых измерений, геофизики, дистанционного зондирования и моделирования — будут иметь решающее значение для снижения неопределенности и улучшения прогнозирования будущей гидрологии холодных регионов.

## **Управление изменчивостью осадков с помощью аккумулирующих резервуаров на фермах<sup>11</sup>**

**Кэти Наварра**

Системы рециркуляции дренажных вод собирают сток в начале сезона и используют его повторно позже, что позволяет агропроизводителям адаптироваться к изменяющимся режимам выпадения осадков и сохранять экономическую эффективность производства.

Рециркуляция дренажных вод для орошения не является новой практикой в засушливых регионах, однако изменение климатических тенденций расширяет её применение в зонах, которые традиционно не сталкиваются с проблемой дефицита водных ресурсов.

---

<sup>11</sup> Источник: Katie Navarra. Manage precipitation volatility with on-farm storage / <https://irrigationtoday.org/news/manage-perception-volatility-with-on-farm-storage/> Опубликовано 2.03.2026

Инженер-строитель Спенсер Печ, сотрудник и совладелец компании *ISG*, отметил, что проблема заключается не в общем количестве осадков в этих районах, а в несоответствии их распределения потребностям сельскохозяйственных культур. Он пояснил, что в начале года наблюдается избыточное количество осадков, что вызывает интенсивный дренаж, тогда как позднее вегетационный период характеризуется дефицитом влаги, что приводит к сложностям с обеспечением оптимального поливного режима.

В октябре 2025 г. *Фонд защиты окружающей среды (EDF)* опубликовал доклад «Экономический анализ рециркуляции сточных вод», в котором показано, что внедрение рециркуляционных систем может быть экономически эффективной стратегией, позволяющей агропроизводителям удовлетворять водные потребности сельскохозяйственных культур в условиях экстремальных гидрометеорологических явлений.

Май Лан Хоанг, старший научный аналитик группы по климатически оптимизированному сельскому хозяйству *Фонда защиты окружающей среды*, отметил, что рециркуляция дренажной воды решает одну из наиболее серьёзных проблем, с которой сегодня сталкиваются фермеры – нестабильность осадков. Она позволяет агропроизводителям аккумулировать избыточную дождевую воду и повторно использовать её позднее, превращая непредсказуемые осадки в управляемый ресурс. По его словам, рециркуляция опирается на существующие дренажные системы для повышения устойчивости и способствует адаптации ферм и сельских сообществ к изменяющимся погодным условиям.

### **Эффективность рециркуляции дренажной воды для различных сельскохозяйственных культур**

Ранние исследования сосредоточили внимание на целесообразности внедрения системы рециркуляции дренажной воды на традиционных полях фермах Среднего Запада США. По словам Спенсера Печа, экономическая эффективность таких инвестиций особенно высока для высокодоходных культур. Современные исследования показывают, что хозяйства с площадями 30–40 акров получают значительную экономическую выгоду от внедрения рециркуляционных систем. При этом Печ наблюдал успешное применение системы одним из производителей попкорна в Айове, который выращивает кукурузу на меньших площадях, и отметил, что рециркуляция дренажной воды хорошо подходит для фермеров, работающих со специализированными культурами.

Основной экономический эффект рециркуляции дренажных вод проявляется через увеличение урожайности. В отчёте *Фонда защиты окружа-*

ющей среды (EDF) оценивается потенциальное повышение дохода от урожая примерно на 150 долларов США с акра в год. Помимо роста урожайности, рециркуляция дренажной воды может способствовать снижению эксплуатационных расходов, если ирригационная система одновременно обеспечивает внесение удобрений. Анализ EDF оценивает экономию до 20 долларов США с акра в год на затратах на оборудование и топливо.

Май Лан Хоанг подчеркнул, что такие достижения особенно важны в современных условиях, когда рентабельность фермерских хозяйств невелика, а погодная изменчивость возрастает.

### **Стоимость установки**

Для фермеров, уже использующих системы орошения, переход на рециркуляцию дренажной воды может заключаться скорее в добавлении резервуаров для хранения воды, чем в полной замене оборудования. В таких хозяйствах обычно уже имеются центрально-поворотные ирригационные системы или другие установки, использующие воду из колодцев или подземных источников.

Спенсер Печ отметил, что наблюдается интерес к внедрению рециркуляционных практик именно в тех хозяйствах, где уже есть ирригационная инфраструктура и дренажные системы. В таких случаях в систему можно интегрировать дополнительное хранение воды – например, пруд или специализированный резервуар.

По его словам, создание пруда или аккумулирующего резервуара может стать ключевым фактором, ограничивающим проект: это выводит участок из-под сельскохозяйственной обработки, а выбор подходящего места требует тщательного планирования. В некоторых хозяйствах для этой цели подходят маргинальные или малопродуктивные участки, тогда как другим может потребоваться жертвовать более ценными землями, что напрямую влияет на экономическую окупаемость проекта.

По словам Май Лан Хоанг, общий анализ показывает, что стоимость проекта рециркуляции дренажной воды может варьироваться от 1,8 до 3,3 млн долларов США в зависимости от условий на участке и конструкции системы. Наибольшие статьи расходов составляют работы по модернизации дренажной системы, проектирование и строительство аккумулирующих резервуаров, а также внедрение ирригационных систем.

Спенсер Печ отметил, что для обеспечения экономической целесообразности большинства рециркуляционных систем аккумулирующих резервуаров требуется внешнее финансирование. Государственные организации, преследующие цели по улучшению качества воды или предотвра-

щению наводнений, такие как департаменты сельского хозяйства штатов или программы Министерства сельского хозяйства США, часто частично покрывают капитальные затраты на строительство таких резервуаров и, в некоторых случаях, расходы на компоненты ирригации.

Хоанг добавил, что рециркуляция дренажной воды приносит пользу не только отдельным фермерским хозяйствам, поэтому государственные инвестиции имеют решающее значение для поддержки землевладельцев, внедряющих эту технологию. Кроме того, такие вложения могут способствовать улучшению качества воды в нижележащие водоёмы. По его словам, стратегия совместных инвестиций между землевладельцами, государственными программами софинансирования и водоотводными округами представляет собой наиболее эффективный подход к распределению затрат между всеми заинтересованными сторонами, получающими выгоду от рециркуляции.

Спенсер Печ отметил, что уникальность системы рециркуляции дренажной воды заключается в возможности демонстрации того, что внедрение этой природоохранной практики может приносить финансовую выгоду землевладельцу и производителю, а также документально подтвержденные преимущества для качества воды.

Он добавил, что рециркуляция дренажной воды на фермах способствует стабилизации урожайности за счёт улучшенного управления водными ресурсами как в засушливые, так и во влажные периоды, а также может оказывать положительное воздействие на окружающую среду в целом.

Май Лан Хоанг подчеркнул, что такая практика открывает возможности для стратегических государственных инвестиций, поскольку приносит пользу местным сообществам, особенно при внедрении передовых методов, таких как создание водно-болотных угодий для улучшения качества воды.

## Технологии мониторинга и точного земледелия

### Технология на основе ИИ измеряет водный стресс виноградника с помощью одного снимка<sup>12</sup>

Технология визуализации растительного покрова с использованием искусственного интеллекта, доказавшая свою эффективность на виноградниках Калифорнии, теперь доступна по всему миру и помогает виноградарям отслеживать водный стресс лоз на целых виноградных участках.

Компания CropX Technologies, входящая в число мировых лидеров в области цифровых агрономических решений, объявила о глобальном запуске CropX Vision — решения для мониторинга урожая на основе искусственного интеллекта, разработанного специально для виноградников, которое позволяет виноградарям измерять уровень водного стресса в виноградниках всего по одному снимку.



<sup>12</sup> Источник: <https://www.agroxxi.ru/selhoztehnika/novosti/tehnologija-na-osnove-ii-izmerjaet-vodnyi-stress-vinogradnika-s-pomoschyu-odnogo-snimka.html> Опубликовано 25.03.2026

CropX Vision анализирует изображения виноградной лозы с помощью передовых методов компьютерного зрения и агрономического моделирования, предоставляя информацию о водном стрессе растений на уровне целых виноградников. Просто сделав снимок виноградной лозы, виноградари и агрономы могут быстро оценить стресс растений и состояние урожая на протяжении всего вегетационного периода и принимать более обоснованные решения по поливу.

Приложение CropX Vision доступно как для Android, так и для iOS, позволяя фермерам легко получать изображения листового покрова непосредственно со своих смартфонов в полевых условиях. Полученные данные автоматически обрабатываются и полностью интегрируются в приложение CropX, что позволяет фермерам и агрономам объединять информацию о стрессе виноградной лозы с другими агрономическими данными для более обоснованного управления орошением.

CropX Vision — это масштабируемая альтернатива барокамере, используемая в течение всего сезона, которая позволяет получать информацию о водном стрессе растений на всем винограднике без громоздкого оборудования или ограниченного отбора проб.

Технология, лежащая в основе системы, основана на многолетних полевых испытаниях инноваций, первоначально разработанных компанией Tule Technologies, калифорнийской компанией, специализирующейся на точном орошении, которую CropX приобрела в 2023 году. Технология измерения параметров кроны винограда, разработанная Tule, широко используется на виноградниках Калифорнии для измерения потребления воды лозами и поддержки управления орошением в высокодоходном виноградарстве.

Благодаря глобальному запуску CropX Vision виноградари по всему миру теперь могут получить доступ к технологии, которая ранее использовалась преимущественно в ведущих винодельческих регионах Калифорнии.

«Искусственный интеллект стремительно трансформирует сельское хозяйство, но для эффективного использования ИИ необходимы высококачественные агрономические данные и многолетние полевые испытания. Система уже была протестирована в самых сложных сельскохозяйственных условиях мира, включая виноградники Калифорнии. С помощью простого изображения производители могут получить ценную информацию о водном стрессе виноградной лозы и принимать более точные решения по орошению», — сказал Йехонатан Димри, вице-президент по продуктам компании CropX Technologies.

Глобальный релиз CropX Vision отражает неизменное стремление CropX к предоставлению технологий, основанных на данных, которые по-

могут фермерам повышать производительность и более эффективно управлять водными ресурсами.

## **Применение геостационарных спутников расширяется в сфере мониторинга земель<sup>13</sup>**

Геостационарные спутники, известные прежде всего своими возможностями для мониторинга погодных условий, также способны отслеживать процессы и нарушения на поверхности суши на обширных территориях практически в режиме реального времени.

Традиционно основная роль геостационарных спутников, вращающихся синхронно с вращением Земли и сохраняющих относительно фиксированное положение на высоте около 36 000 км над поверхностью планеты, заключалась в предоставлении критически важных данных для прогнозирования погоды. В настоящее время они становятся мощным инструментом для наблюдения и других изменений на земной поверхности.

Спутники, такие как серия геостационарных оперативных экологических спутников GOES-R, Himawari-8 и Himawari-9, Fengyun-4 (FY-4) и корейский многоцелевой геостационарный спутник GK-2A, обладают уникальными возможностями для высокочастотного мониторинга обширных территорий. Обеспечивая наблюдения с интервалом 5–15 минут, они предоставляют временное разрешение, существенно превосходящее полярные или низкоорбитальные спутниковые датчики, такие как спектрорадиометр среднего разрешения MODIS и мультиспектральный имиджер Sentinel-2. Эти датчики, как правило, обеспечивают более редкое покрытие: один или два снимка в день в случае MODIS и один раз в пять дней для Sentinel-2.

Благодаря высокому временно-пространственному разрешению данные геостационарных спутников особенно эффективны для мониторинга динамики земной поверхности, включая суточные и сезонные изменения экосистем. Они позволяют своевременно обнаруживать и отслеживать стремительные процессы, такие как лесные пожары, наводнения, заморозки и тепловые волны. Кроме того, эти наблюдения могут способствовать охране тропических лесов, разработке стратегий достижения углеродной нейтральности и применяться в других областях.

---

<sup>13</sup> Источник: Xiangzhong Luo, Misaki Hase, Xuanlong Ma, Yuhei Yamamoto and Kazuhito Ichii. Geostationary Satellite Applications Expand into Land Monitoring / <https://eos.org/science-updates/geostationary-satellite-applications-expand-into-land-monitoring> Опубликовано 13.03.2026

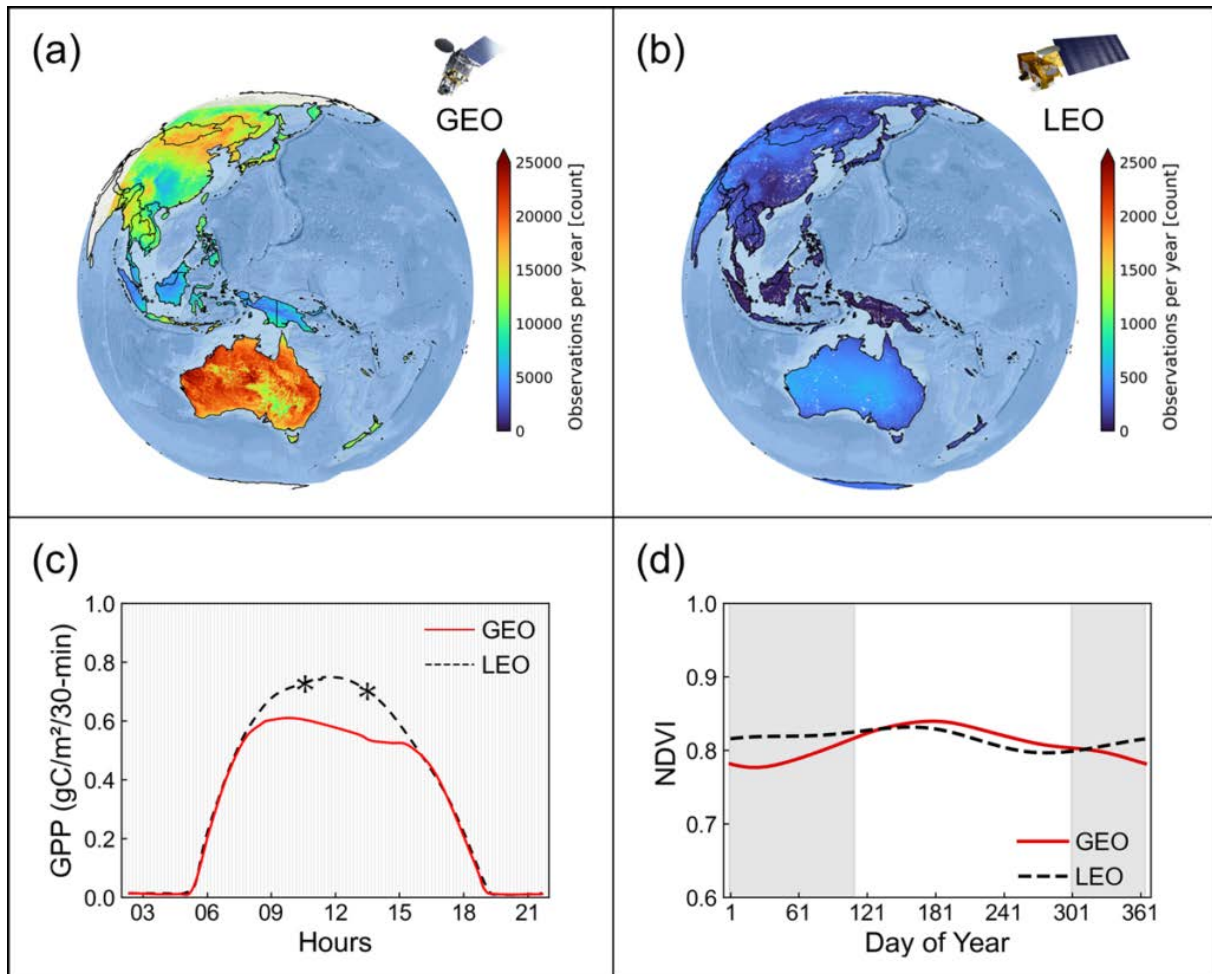
За последние пять лет наблюдается значительный прогресс в использовании геостационарных спутников для мониторинга наземных экосистем с высокой временной разрешающей способностью. Одновременно потоки данных о поверхности суши, поступающие с различных геостационарных платформ, продолжают совершенствоваться и становятся всё более доступными для практического применения.

В данной работе рассматриваются примеры применения таких высокочастотных наблюдений для оптимизации мониторинга земельных ресурсов на основе выводов экспертных дискуссий, состоявшихся на недавнем международном семинаре. Кроме того, анализируются возможности для исследователей и лиц, принимающих решения, по дальнейшему раскрытию потенциала этих данных.

### **Новые взгляды на экосистемные процессы**

Высокочастотные наблюдения с геостационарных спутников предоставляют данные с беспрецедентным временным разрешением, что открывает новые возможности для изучения экосистемных процессов. В Азиатско-Тихоокеанском регионе спутники Himawari-8 и Himawari-9 собирают до 25 000 наблюдений в год, что в среднем составляет почти 70 снимков в день по всему региону — примерно в 100 раз больше, чем частота съемки полярно-орбитального спутника MODIS. При этом пространственное разрешение датчиков Himawari (~1 км) сопоставимо с разрешением MODIS (~500 м).

Такое высокочастотное покрытие позволяет фиксировать суточную динамику экосистем, которая часто ускользает от датчиков на полярной орбите. Например, в недавнем исследовании данные Himawari-8 и -9 о температуре поверхности земли (Land Surface Temperature, LST) и солнечной радиации в 18 точках Японии и Южной Кореи использовались для построения модели, выявившей дневное снижение фотосинтеза. Модель на основе MODIS, ограниченная всего двумя снимками в день, не смогла зафиксировать эту динамику. Аналогично, спутники серии GOES-R позволили наблюдать повсеместное снижение фотосинтеза в полдень в засушливые дни в Северной Америке, что противоречит традиционному предположению о том, что пик фотосинтеза совпадает с максимумом солнечной радиации.



Наблюдения с геостационарных спутников (GEO) предоставляют новые данные о процессах в экосистемах на высоких временных масштабах. (a) Например, спутник Himawari-8 собирает гораздо больше наблюдений в ясные дни в год, чем (b) датчики полярных или низкоорбитальных (LEO) спутников, такие как спектрорадиометр среднего разрешения (MODIS). Обратите внимание на разные величины масштабов. (c) Наблюдения с геостационарных спутников также могут выявить полуденное снижение фотосинтеза (измеряемое как валовая первичная продуктивность, GPP), как показано красной кривой для лесного участка в Японии. Серые вертикальные линии указывают время наблюдений с помощью Himawari-8 и -9, а звездочками обозначены два ежедневных снимка, сделанных датчиком MODIS, который не обнаружил сигнала снижения фотосинтеза. (d) Сезонность зелени растительности (измеряемая нормализованным разностным индексом растительности, NDVI) в тропическом азиатском лесу, обнаруженная спутниками GEO и LEO, также различается. Серая заливка указывает на влажные сезоны. Данные взяты из работы Tian et al. [2025].

Причины такого подавления фотосинтеза до конца не выяснены, однако оно, вероятно, связано с необходимостью растений справляться с более значительным дефицитом давления паров (Vapor Pressure Deficit, VPD) в полдень. Независимо от механизмов, это явление оказывает существенное влияние на валовую первичную продуктивность (Gross Primary Productivity, GPP). В совокупности результаты демонстрируют, как геостационарные спутники дополняют полярно-орбитальные данные, восполняя пробелы в суточной динамике и позволяя более детально оценивать экосистемные процессы при тепловом стрессе и стрессовых условиях, связанных с дефицитом влаги.

Высокочастотные наблюдения с геостационарных спутников также позволяют проводить более частый мониторинг тропических регионов, обладающих наибольшим запасом углерода и биологическим разнообразием среди всех наземных экосистем. Долгое время постоянный облачный покров, особенно в сезон дождей, ограничивал получение четких спутниковых снимков тропиков; при редких повторных пролетах датчики на полярной орбите часто передавали изображения, замутненные облачностью. Геостационарные спутники, напротив, снимают поверхность многократно в течение дня, что значительно повышает вероятность получения облачно-независимых наблюдений. Например, MODIS в среднем обеспечивает четкие наблюдения над тропической Азией только в 40 % дней, тогда как Himawari-8 — в 80 % дней.

Благодаря высокой частоте съемок в недавних исследованиях с использованием спутников GOES-R, Himawari-8 и Himawari-9 удалось проанализировать сезонную динамику тропических лесов в Амазонии и Юго-Восточной Азии. В частности, в этих исследованиях было отчетливо зафиксировано озеленение вечнозеленых широколиственных лесов в засушливые сезоны, что позволило пролить свет на долгие дискуссии о механизмах и причинах подобных явлений (рис. 1d).

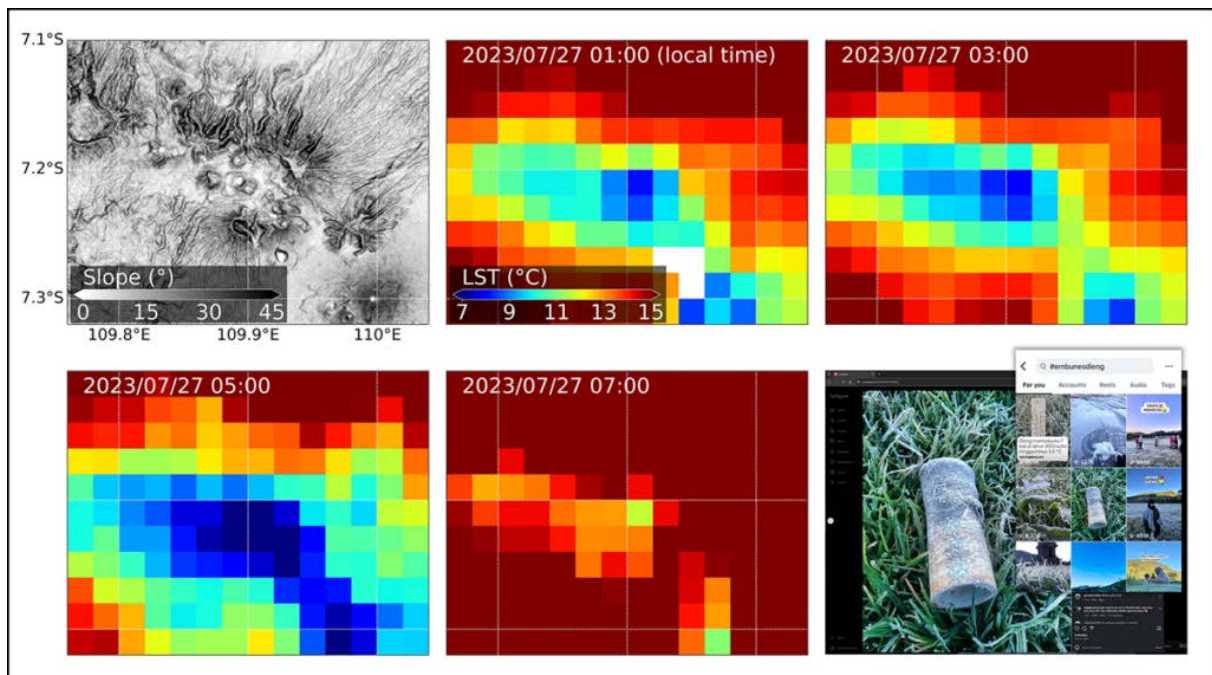
### **Быстрый мониторинг нарушений земельного покрова в режиме реального времени**

Геостационарные спутники также позволяют проводить оперативный и непрерывный мониторинг нарушений и угроз земельного покрова. Многие из этих процессов имеют слишком кратковременный характер, чтобы их можно было надежно фиксировать с помощью полярно-орбитальных спутников.

Недавно исследователи использовали данные геостационарных платформ для отслеживания краткосрочных погодных явлений, включая

внезапные засухи, оползни и тропические штормы. В частности, данные серии GOES-R применялись для почасовых оценок выбросов от лесных пожаров в высокоширотных районах Северной Америки, предоставляя ценную информацию для регионального прогнозирования качества воздуха в местах, где ранее такие данные были недоступны.

Другой пример был представлен на недавнем семинаре. С использованием данных о температуре поверхности земли (Land Surface Temperature, LST) со спутников Himawari-8 и Himawari-9 исследователи отслеживали ночное скопление холодного воздуха над плато Диенг в Индонезии и выявляли признаки начинающихся заморозков, угрожавших картофельным полям. Оповещения, формируемые на основе спутниковых наблюдений с интервалом 10 минут и сверявшиеся с местными сообщениями о заморозках в социальных сетях, позволяли фермерам своевременно получать предупреждения о рисках.



*Геостационарные спутники могут предоставлять сигналы раннего предупреждения о поверхностных возмущениях, таких как заморозки, затронувшие картофелеводы на плато Диенг в Индонезии летом 2023 года. Карта (вверху слева), затененная по уклону поверхности земли, подчеркивает топографию региона. Сетчатые панели данных о температуре поверхности земли со спутника Himawari-9 [Yamamoto et al., 2022, 2025] показывают формирование зоны холодного воздуха в течение 6 часов 27 июля 2023 года. На нижней правой панели показан скриншот результатов поиска в Instagram по хэштегу #embunesdieng, который включает публикации, визуально демонстрирующие возникновение заморозков в регионе плато Диенг тем же утром.*

Этот пример демонстрирует, как данные высокой частоты, в частности тепловые наблюдения с геостационарных спутников, могут напрямую использоваться для поддержки оперативных решений на местном уровне в сельском хозяйстве и в системах смягчения последствий природных катастроф.

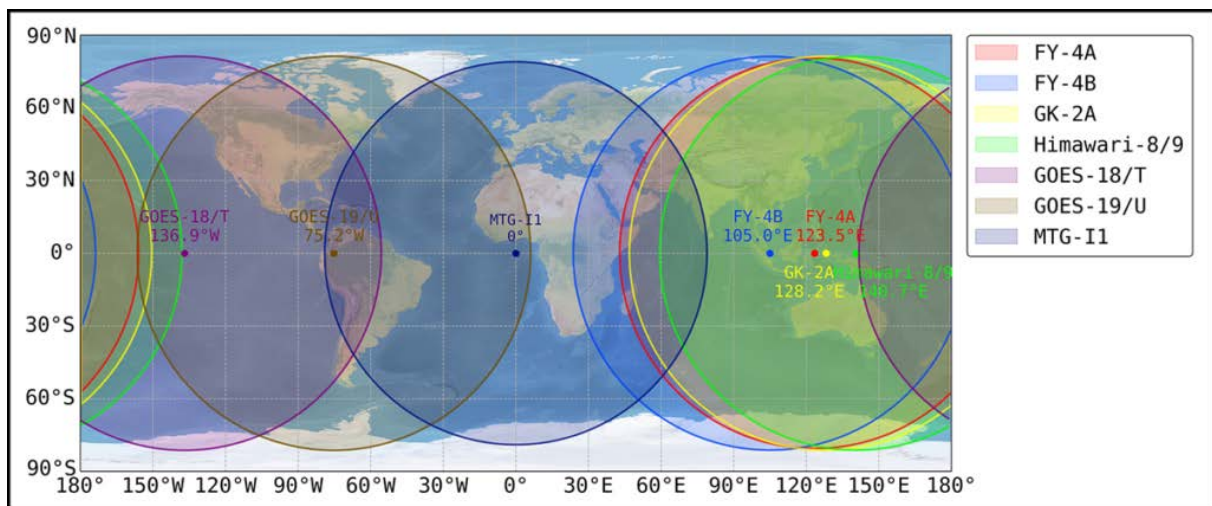
### **Новые возможности и текущие вызовы**

В последние годы исследователи активно работают над реализацией потенциала геостационарных спутников для мониторинга наземных экосистем, занимаясь обработкой и предоставлением ключевых продуктов данных о поверхности суши с различных платформ. Спутники Himawari-8 и Himawari-9 предоставляют высококачественные данные о температуре поверхности земли (Land Surface Temperature, LST) и коэффициенте отражения поверхности земли (Land Surface Reflectance, LSR) через портал данных, размещённый на серверах Университета Тибы. Продукты LST и LSR за 2020 финансовый год доступны соответственно в Национальном центре спутниковой метеорологии и Университете Ланьчжоу. Серия спутников GOES-R предоставляет данные LSR через NOAA.

Данные LSR из этих источников используются для расчета индексов растительности, таких как нормализованный разностный индекс растительности (NDVI), применяемых в фенологических исследованиях и мониторинге быстрых изменений экосистем. Они также легли в основу системы ALIVE (Advanced Baseline Imager Live Imaging of Vegetated Ecosystems), предоставляющей информацию о ключевых функциях экосистемы, таких как наземный фотосинтез и эвапотранспирация, с временным разрешением всего 5 минут.

Несмотря на достигнутый прогресс, дистанционное зондирование наземных экосистем с использованием геостационарных спутников по-прежнему находится на ранней стадии развития, и расширение его применения сопряжено с рядом вызовов. Для получения точных и сопоставимых данных необходимы надежные процедуры калибровки и валидации. Например, данные об отражательной способности поверхности (Land Surface Reflectance, LSR) требуют корректировки с учётом угловых эффектов и параллакса, возникающих из-за больших углов обзора датчиков геостационарных спутников. Эти факторы могут создавать трудности при использовании существующих моделей переноса излучения, которые симулируют распространение электромагнитного излучения в атмосфере и внутри растительного покрова.

Ещё одной проблемой является то, что даже при формировании наборов данных для мониторинга поверхности суши могут возникать узкие места в их доставке пользователям. Объёмы данных, собираемых геостационарными спутниками с интервалом менее часа, чрезвычайно велики, однако их распространение по-прежнему во многих случаях зависит от устаревших инструментов передачи, таких как FTP (File Transfer Protocol) или веб-порталы с ограниченной интеграцией в облачные платформы, например Google Earth Engine. Исключением является облачное распространение данных GOES-R от NOAA. Эти ограничения не только замедляют исследования в области обработки данных и разработки продуктов мониторинга поверхности суши, но и снижают их доступность для конечных пользователей.



*Здесь показаны области, охватываемые различными действующими геостационарными спутниками. Текущая группировка включает в себя серию геостационарных оперативных спутников наблюдения окружающей среды (GOES-R) (GOES-16, -17, -18 и -19; здесь показаны только GOES-18 и -19), охватывающую Северную и Южную Америку; спутник третьего поколения Meteosat (MTG-I1), охватывающий Европу и Африку; а также спутники Fengyun-4 (FY-4A и -4B), многоцелевой геостационарный спутник Korea-2A (GK-2A) и Himawari-8 и -9, охватывающие Азию и Океанию. Изображение: Адаптировано из Deng and Ma [2026], CC BY-NC 4.0*

Кроме того, географическое покрытие и использование данных геостационарных спутников остаются неравномерными. Каждый спутник наблюдает за фиксированным полушарием, что делает применение его данных преимущественно региональным. Различия в конструкции спутниковых датчиков, геометрии наблюдения и конвейерах обработки данных

также осложняют совместимость продуктов, хотя платформа GeoNEX от NASA является важным шагом к их гармонизации.

В сравнении с Африкой, где основным доступным геостационарным спутником является Meteosat третьего поколения (MTG), и Северной и Южной Америкой, где основное покрытие обеспечивается GOES-R, Азия в последние годы получила более плотное наблюдение благодаря нескольким геостационарным спутникам (Himawari-8 и -9, Fengyun-4, GK-2A). Это делает регион идеальной площадкой для сравнительного анализа и гармонизации данных между различными датчиками.

В перспективе исследователям и разработчикам космических миссий следует стремиться к сбору долгосрочных геостационарных данных, полезных для оперативного мониторинга поверхности Земли, к совершенствованию процедур обработки и калибровки для обеспечения качества данных об отражательной способности поверхности, а также к улучшению интеграции и совместимости различных наборов данных. С учетом активного развития алгоритмов для получения информации о поверхности Земли и планируемых последующих миссий (например, Himawari, FY-4D/E/F, расширение MTG) геостационарные спутники смогут и далее способствовать углубленному изучению не только изменений погоды, но и быстрых процессов и возмущений на поверхности Земли практически в реальном времени на значительной части планеты.

## **Искусственный интеллект и передовые сенсорные технологии выводят сельское хозяйство в новую эру точного земледелия<sup>14</sup>**

Сельское хозяйство постепенно переходит от ручного труда и наблюдений, основанных на опыте, к принятию решений на основе данных, которое обеспечивается современными системами сбора информации и технологиями искусственного интеллекта.

В новой научной статье под названием «Ускорим будущее: каковы ключевые факторы развития измерений с помощью интеллектуальных датчиков в сельском хозяйстве?», опубликованной в журнале «Plants», авторы представляют интеллектуальные системы мониторинга как один из основных компонентов концепции «Сельское хозяйство 4.0» и подчерки-

---

<sup>14</sup> Источник: AI and advanced sensors are pushing agriculture into new precision era / <https://www.devdiscourse.com/article/technology/3832405-ai-and-advanced-sensors-are-pushing-agriculture-into-new-precision-era> Опубликовано 12.03.2026

вают их роль как ключевого фактора повышения эффективности и устойчивости растениеводства.

### **Датчики и технологии искусственного интеллекта становятся новой основой инфраструктуры сельского хозяйства**

Согласно исследованию, датчики предоставляют визуальные и экологические данные, которые создают возможности для внедрения точного земледелия. При этом авторы статьи подчеркивают, что одних лишь датчиков недостаточно для прорыва в отрасли. Настоящее новшество заключается в сочетании сенсорных систем с моделями машинного и глубокого обучения, способными выявлять закономерности, диагностировать проблемы и преобразовывать необработанные данные в практические решения. В этом контексте редакция рассматривает интеллектуальное зондирование как комплексную задачу, затрагивающую как аппаратное, так и программное обеспечение.

В статье анализируется широкий спектр сенсорных методов, уже применяемых в различных сельскохозяйственных сценариях. Системы RGB-съемки и стереоскопической съемки с измерением глубины способствуют распознаванию болезней и взаимодействию с роботизированными устройствами. Индексы растительности, такие как индекс отражательной способности растительности (RVI) и нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), особенно в сочетании с изображениями с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), помогают отслеживать состояние посевов и эффективность использования питательных веществ. Гиперспектральное зондирование расширяет эти возможности за счет сбора подробных спектральных сигнатур, полезных для классификации сортов и управления вводимыми ресурсами. Эти системы применяются для обнаружения болезней, мониторинга вредителей, картографирования сорняков, фенотипирования культур, управления роботами и передачи знаний.

Редакция также отмечает, что компьютерное зрение по-прежнему остается одной из ключевых движущих сил этого сдвига. Сверточные нейронные сети сохраняют важную роль, так как они способны извлекать полезные характеристики изображения — такие как края, цвета и текстуры — непосредственно из пиксельных данных, что делает их особенно эффективными для задач классификации и обнаружения объектов в полевых условиях. Вместе с тем авторы статьи указывают, что архитектурные границы смещаются за пределы стандартных CNN в сторону трансформаторных моделей, которые обрабатывают изображение целиком и улавливают более широкий визуальный контекст. Это преимущество особенно важно,

когда урожай, сорняки и симптомы болезней проявляются на засорённых и изменчивых полях.

В сельском хозяйстве редко встречаются «чистые» условия для сбора данных, как в лаборатории. Изменения освещения, густая листва, переплетающиеся растения, подвижные платформы и неоднородный фон затрудняют распознавание объектов в реальных фермерских хозяйствах. В статье выделяются механизмы фокусировки внимания и трансформаторные системы как решения этой проблемы, поскольку они позволяют моделям сосредоточиться на мелких деталях, одновременно отслеживая взаимосвязи между объектами на большом расстоянии. Редакция описывает это как одну из основных архитектурных тенденций, способствующих переходу искусственного интеллекта в сельском хозяйстве от теории к практическому применению.

В статье также отмечается, что не менее важную роль играет миниатюризация. Модели искусственного интеллекта больше не могут полностью полагаться на мощные удалённые серверы, если они предназначены для работы на мобильных устройствах, дронах или периферийном оборудовании в полевых условиях. Именно поэтому авторы уделяют особое внимание облегчённым архитектурам, стратегиям «обрезки», оптимизации магистральных компонентов и другим методам, направленным на повышение вычислительной эффективности. По их мнению, эффективность вычислений — это не второстепенный вопрос, а один из ключевых факторов, определяющих, смогут ли интеллектуальные сенсорные системы перейти от впечатляющих результатов исследований к широкому внедрению в сельском хозяйстве.

### **В области выявления болезней, борьбы с сорняками и прогнозирования урожайности наблюдается стремительный прогресс**

Редакция показывает, что выявление заболеваний является одной из наиболее динамично развивающихся областей применения интеллектуальных сенсорных технологий. Авторы подчеркивают, что реальные полевые условия, ограниченность размеченных наборов данных и наличие фоновых помех долгое время ограничивали эффективность моделей, однако новые архитектуры начинают сокращать этот разрыв. В частности, системы на основе механизмов внимания, подходы с использованием диффузионных трансформаторов и мультимодальные модели применяются для улучшения распознавания заболеваний в более реалистичных условиях.

Среди приведённых примеров указывается, что адаптивная сеть скрытых переменных с пространственным вниманием к состояниям до-

стигла средней точности 0,91 при работе в абрикосовых садах, а внимание к состояниям в пространстве состояний при распознавании болезней листьев кукурузы повысило точность до 0,95. Подсчёт колосьев пшеницы и обнаружение болезней улучшились благодаря использованию внимания к плотности вероятности, а обнаружение болезней редиса достигло 93-процентной точности с помощью гибридных механизмов внимания. Автор также отмечает преимущества обучения на небольших наборах данных при работе с листовыми овощами, где системы внимания к прототипам помогли преодолеть нехватку данных о болезнях, сохранив при этом высокую эффективность обнаружения.

В редакционной статье утверждается, что одним из важнейших шагов вперёд является отход от систем, работающих исключительно с изображениями. В качестве ориентира для дальнейшего развития этой области авторы представляют мультимодальный трансформер, который интегрирует данные изображений, текстовую информацию и показатели сенсоров. Отмечается, что эта модель не только демонстрировала высокие показатели по обнаружению болезней, но и генерировала описательный текст, а также функционировала как интеллектуальная система ответов на вопросы. Редакция делает вывод, что в будущем искусственный интеллект в сельском хозяйстве сможет не только выявлять проблемы, но и объяснять их понятным языком, связывая с более широким контекстом.

В исследовании также рассматривается подход на основе машинного обучения с использованием гиперспектральных данных, полученных с помощью БПЛА, и алгоритмов SVM-XGBoost для классификации азотоэффективных сортов пшеницы с точностью 83 %. В редакционной статье упоминается модель Random Forest в сочетании с растительными индексами для прогнозирования урожайности семян гладкого бromeграсса, при этом содержание азота в листьях выявлено как ключевой предиктор, а модель урожайности достигла значения  $R^2$  0,75. Эти примеры демонстрируют, что интеллектуальные сенсорные системы выходят за рамки обнаружения болезней и находят применение в стратегии питания растений и планировании производства.

Методы борьбы с сорняками и вредителями также претерпевают быстрые изменения. В статье отмечается, что индивидуальный подход к борьбе с сорняками представляет собой значительный отход от повсеместного применения гербицидов, которое часто приводит к чрезмерному использованию химикатов на голой почве и в нецелевых зонах. Новые системы глубокого обучения поддерживают модель «увидел — опрыскал», при которой меры принимаются на основе фактического обнаружения сорняков, а не в рамках повсеместной обработки. Так, при работе с кукурузой система YOLOv11 достигла средней точности 97,5 % в режиме реального времени, а версия YOLOv11m признана особенно практичной для

полевого применения благодаря сочетанию высокой точности и низкого энергопотребления.

Редакция также освещает облегчённую модель обнаружения сорняков, построенную на основе трансформатора скрытой диффузии для мобильного применения, а также системы точечного опрыскивания с использованием БПЛА, которые позволили сократить расход гербицидов на 47 % по сравнению с традиционным сплошным опрыскиванием без ущерба для эффективности борьбы с сорняками и урожайности. Параллельно развивается система мониторинга вредителей: модифицированная модель YOLOv5s, развернутая на БПЛА, достигла средней точности 95,0 % при обнаружении нескольких видов насекомых. Эти результаты подтверждают, что интеллектуальное зондирование становится ключевым инструментом не только для диагностики здоровья сельскохозяйственных культур, но и для целенаправленного вмешательства.

### **Искусственный интеллект на периферийных устройствах и робототехника, имитирующая поведение человека, могут определить следующий этап развития «умного» сельского хозяйства**

Если выявление болезней и картографирование сорняков представляют собой «перцептивную» сторону интеллектуального мониторинга, то следующим этапом является объединение этой перцепции с действиями в реальном времени. Редакция подчеркивает проблему запуска сложных моделей на аппаратных средствах с ограниченными ресурсами, поскольку в реальных сельскохозяйственных системах часто приходится использовать мобильные телефоны, дроны, встроенные периферийные устройства или автономные роботы вместо стационарных высокопроизводительных серверов.

В статье приводятся примеры оптимизации моделей для работы на мобильных устройствах. Так, модель YOLOv5s-BiPCNeXt для распознавания болезней баклажанов работала на Jetson Orin Nano со скоростью 26 кадров в секунду, что соответствовало требованиям работы в реальном времени. Модель для распознавания болезней винограда, использующая мультимодальные данные и параллельные гетерогенные функции активации, была достаточно оптимизирована для работы на iPhone 15 со скоростью 56 кадров в секунду. При обнаружении болезней листьев томатов оптимизация гиперпараметров позволила модели YOLOv11m достичь показателя пригодности 0,99. Облегчённая конструкция Faster R-CNN также улучшила производительность распознавания растений на сельскохозяйственных устройствах без необходимости использования серверного аппаратного обеспечения.

Редакция рассматривает эти примеры как доказательство того, что эффективность стала основным условием прогресса. Недостаточно, чтобы модель демонстрировала хорошие результаты в тестовой среде, если она не способна работать на реальной скорости, на реальном оборудовании и в сложных условиях фермерского хозяйства. Именно поэтому в редакционном обзоре, посвящённом интеллектуальному сбору данных, особое внимание уделяется проектированию с учётом аппаратных особенностей, сжатую моделей, эффективным механизмам внимания и быстрому вычислению.

Далее в статье рассматривается, пожалуй, наиболее перспективная область — роботизированные манипуляции. В сельском хозяйстве наблюдается переход от роботов, способных лишь воспринимать окружающую среду, к роботам, умеющим умело взаимодействовать с хрупкими сельскохозяйственными культурами. Эта задача сложнее, так как требует интеграции зрительного восприятия, принятия решений и тонких физических движений. В статье подчёркивается, что «передача человеческих навыков» является ключевым шагом в решении этой задачи: включая траектории движений человека в циклы обучения с подкреплением, исследователи помогают роботам осваивать движения, которые выглядят не как грубая автоматизация, а как отработанные человеческие манипуляции.

Одним из примеров, приведённых в статье, является робот-манипулятор для сбора гроздей помидоров, в котором использовалась усовершенствованная модель Deep Deterministic Policy Gradient, обученная на траекториях движения человека. Это позволило повысить точность достижения цели на 51,3 %. Другим примером является двухрукий робот для сбора яблок, который достиг коэффициента параллельной работы до 99 % без взаимного вмешательства конечностей. Редакция также указывает на системы восстановления изображений на основе GAN, такие как AGG-DeblurGAN, которые помогают робототехническим системам поддерживать качество обнаружения в садах с размытием от движения и значительно повышают эффективность обнаружения цитрусовых.

Редакция подчёркивает, что эти системы демонстрируют развитие сельскохозяйственной среды, в которой технологии распознавания на основе искусственного интеллекта, робототехника и датчики всё больше интегрируются в замкнутые циклы сельскохозяйственных операций. Дрон снимает поле, модель классифицирует сорняки или болезни, встроенная или расположенная поблизости периферийная система быстро принимает решение, а робот или высокоточный опрыскиватель выполняет необходимые действия. Редакция отмечает, что эта последовательность демонстрирует: интеллектуальные датчики больше не просто позволяют «видеть больше». Речь идёт о создании автономных сельскохозяйственных систем,

способных наблюдать, интерпретировать и реагировать с всё большей точностью.

В этой статье также освещаются существующие препятствия. Редакция отмечает, что на пути к созданию полностью интегрированного цифрового хозяйства по-прежнему стоят слабая стандартизация в отрасли, ограниченная совместимость между платформами и сохраняющиеся пробелы в оперативной информации. Эти препятствия нельзя считать незначительными: именно от них зависит, смогут ли исследовательские системы реально масштабироваться и находить применение в работе современных сельскохозяйственных предприятий.

## **Фруктовые деревья между грядками увеличивают доход фермеров в несколько раз<sup>15</sup>**

Фруктовые деревья между грядками способны решить сразу две задачи, которые принято считать конкурирующими: поглощение углерода и рост доходов фермеров.

К такому выводу пришли исследователи, изучившие агролесоводческие хозяйства в полузасушливом регионе Виндхья на севере Индии — территории с бедными почвами и минимальными осадками, то есть в заведомо невыигрышных условиях.

Учёные сравнили семь типов хозяйств: чистые сады манго, гуавы и индийского крыжовника, тиковую плантацию, традиционное поле с пшеницей и машем, а также смешанные участки, где фруктовые деревья перемежались с теми же однолетними культурами. В каждом случае измерялось содержание углерода в растительности, биомассе и почве.

По способности удерживать углерод победил чистый манговый сад — 46,63 тонны на гектар. Самые высокие темпы поглощения показал сад гуавы — почти 8 тонн эквивалента CO<sub>2</sub> на гектар в год. Традиционное земледелие без деревьев оказалось на последнем месте по всем показателям.

Однако экономически выгоднее всего оказалась не чистая монокультура, а именно смешанная система: манго плюс пшеница и маш. Фермеры

---

<sup>15</sup> Источник: <https://ecosphere.press/2026/04/15/fruktovye-derevya-mezhdu-gryadkami-uvlichivayut-dohod-fermerov-v-neskolko-raz/> Опубликовано 15.04.2026

на таких участках получали более 4800 долларов чистой прибыли с гектара в год — почти в пять раз больше, чем при традиционном земледелии.

Авторы подчёркивают, что универсального рецепта нет. Оптимальная модель зависит от конкретных условий и приоритетов: одни хозяйства выиграют от максимального поглощения углерода, другим важнее стабильный доход. Но главное, что показало исследование: в большинстве сценариев дерево на поле лучше, чем его отсутствие.

## Практики и стратегии устойчивого агропроизводства

### Выбор сбалансированной стратегии<sup>16</sup>

Дефицитное орошение может повышать качество сельскохозяйственных культур и экономить воду, однако без тщательного планирования времени и мониторинга оно сопряжено с определёнными рисками.

Производители сельскохозяйственной продукции испытывают возрастающее давление, вынуждающее их максимально эффективно использовать все ресурсы для балансирования растущих производственных затрат и всё более изменчивых погодных условий. В этой связи дефицитное орошение рассматривается как одна из стратегий, которую фермеры могут применять для выращивания культур в засушливых условиях с целью поддержания или повышения урожайности и улучшения рыночных характеристик продукции.

По словам Даниэле Заккарии, доктора наук и профессора по управлению водными ресурсами в сельском хозяйстве в Кооперативном отделении Университета Калифорнии в Дэвисе, принцип дефицитного орошения прост, однако его практическая реализация является более сложной задачей. Эффективное применение данной стратегии предполагает соблюдение баланса между урожайностью и желаемыми характеристиками культур, что требует понимания оптимального времени проведения орошения, культур, для которых эта стратегия может быть полезной, и целевого уровня дефицита воды.

Мэтт Йост, доктор наук и временный руководитель кафедры растений, почв и климата Университета штата Юта, отмечает, что стресс, вызванный дефицитом воды, при его применении на неправильных этапах роста культур может иметь пагубные последствия для урожая. Он подчёркивает необходимость учета цикла роста каждой культуры и определения периодов, когда растения наиболее нуждаются в воде.

Согласно мнению исследователей, умеренный или средний преднамеренный стресс на ключевых этапах роста может способствовать выращиванию более устойчивых культур, улучшению состава специализированных культур и сохранению урожайности. Вместе с тем, отмечается, что не все культуры могут извлечь выгоду из применения дефицитного орошения.

---

<sup>16</sup> Источник: Katie Navarra. A Balancing Act / <https://irrigationtoday.org/features/a-balancing-act/> Опубликовано 28.01.2026

## Что такое дефицитное орошение?

Дефицитное орошение определяется как стратегия, при которой используется меньше воды, чем требуется для полного обеспечения потребностей сельскохозяйственных культур, то есть фактически происходит урезка водоподачи. По словам Даниэле Заккарии, целью такой стратегии является одновременно достижение целевых показателей качества продукции и экономия водных ресурсов.

Мэтт Йост отмечает, что в штате Юта кислые вишни хорошо реагируют на дефицитное орошение: при сокращении водоподачи содержание сахара в плодах может увеличиваться, а риск растрескивания при сборе урожая — снижаться. Аналогичные эффекты наблюдаются у миндаля, фисташек и винограда, где дефицитное орошение способно улучшать рыночные характеристики продукции, такие как качество корма, баланс сахара и кислоты в винограде, а также степень растрескивания и раскола скорлупы у миндаля и фисташек.

Заккария подчеркивает, что в условиях действующих правил регулирования водных ресурсов в Калифорнии, ограниченной добычи подземных вод в соответствии с Законом об устойчивом управлении подземными водами 2014 г. и растущей изменчивости запасов поверхностных вод, дефицитное орошение приобретает особое практическое значение для производителей.

Поскольку на сельское хозяйство приходится 70–80 % мирового потребления воды, а проблема водного дефицита становится все более актуальной, дефицитное орошение рассматривается как потенциально полезная стратегия. Вместе с тем, по словам Заккарии, эта область науки ещё не достигла совершенства, а вопрос экономии воды остаётся спорным. Он отмечает, что, хотя дефицитное орошение широко изучается, количественная оценка реальной экономии воды проведена недостаточно.

Заккария добавляет, что после одного или двух сезонов ограничений водоподачи, вызванных либо засухой, либо строгими нормативными требованиями, производителям необходимо использовать дополнительное количество воды в межсезонье для промывки солей, накопившихся в корневой зоне почвы. Он подчёркивает, что необходимость промывки солей часто упускается из внимания регулирующих органов, а потребность в дополнительной воде для этой цели редко учитывается при расчёте реальной экономии воды при дефицитном орошении.

## Каковы преимущества?

Намеренное применение дефицитного орошения может способствовать повышению рыночной стоимости продукции, при этом иногда наблюдается незначительное снижение урожайности. Преимущества данной стратегии варьируются в зависимости от конкретной культуры и существенно зависят от сроков и степени водного дефицита.

В качестве примеров того, как дефицитное орошение может улучшать показатели различных сельскохозяйственных культур, исследователи выделяют следующие случаи:

- **Кормовые культуры**, такие как люцерна, демонстрируют улучшение качества биомассы при умеренном дефиците воды. Это проявляется в повышении содержания питательных веществ, улучшении усвояемости и повышении качества кормов для скота. Время и степень водного стресса существенно влияют на накопление вещества и могут ускорять производство семян при выращивании люцерны на семена.
- **Помидоры** характеризуются улучшением качества урожая, включая более высокое содержание твердых веществ, сахара и кислот, при правильно организованном дефицитном орошении в период созревания плодов. Эти показатели ценятся переработчиками и способствуют более эффективной уборке урожая за счёт синхронизации созревания помидоров.
- **Виноград**: по словам Заккарии, умеренный или средний водный дефицит до начала созревания и во время созревания винограда позволяет контролировать интенсивный вегетативный рост, при этом фотосинтез продолжается на неизменном уровне, обеспечивая производство углеводов. Такую стратегию можно реализовать, определяя пороги стресса для лоз с целью уменьшения избыточного вегетативного роста, обеспечения достаточного фотосинтеза и обеспечения оптимального покрытия плодов листвой для защиты от солнечного ожога, а также предотвращения нового вегетативного роста.
- **Орехоплодные культуры**, такие как миндаль и фисташки, являются предметом наиболее детальных исследований в области дефицитного орошения. Например, в случае миндаля применение этой стратегии позволяет снижать риск гнили скорлупы и способствует более интенсивному растрескиванию плодов, что положительно сказывается на их рыночной ценности.

Помимо улучшения конкретных характеристик, востребованных на рынке, наличие даже ограниченного количества воды предпочтительнее полной или существенной потери урожая.

По словам Заккарии, когда водные ресурсы ограничены и их недостаточно для полного орошения, способного удовлетворить потенциальные потребности растений или обеспечить максимальную урожайность, применение дефицитного орошения оказывается выгодным, поскольку позволяет получить товарный урожай и прибыльную культуру даже при неполном водоснабжении.

### **Когда лучше всего приступить к реализации?**

Временные рамки применения дефицитного орошения зависят от конкретной культуры и конкретной ситуации. Использование этой стратегии в неподходящее время может отрицательно сказаться на урожайности и качестве продукции. Рекомендуется начинать с изучения водных потребностей конкретной культуры и её реакции на полив; соответствующие данные публикуются, например, ФАО. Далее важно изучить стадии роста растений.

Мэтт Йост отмечает, что периоды подготовки растения к образованию семян или зерна являются особенно чувствительными. При сокращении полива в этот период нарушается процесс формирования урожая, что может приводить к значительным потерям. В то же время, на ранних стадиях роста растение способно переносить определённый уровень водного стресса.

Все культуры имеют чувствительные и нечувствительные к водному стрессу стадии, и ключевым моментом при дефицитном орошении является определение периодов, когда лёгкий стресс окажет наименьшее негативное воздействие или даже положительный эффект на рост и развитие. На следующих стадиях можно рассматривать влияние дефицитного орошения более детально.

- **Ранний вегетативный рост:** в период формирования кроны большинство сельскохозяйственных культур проявляет высокую чувствительность к водному дефициту. Недостаток воды на этом этапе может снижать продукцию углеводов, замедлять рост растений и уменьшать потенциальную урожайность.
- **Цветение и опыление:** дефицит воды в репродуктивной фазе способен резко уменьшать урожайность плодов или зерна.

- **Середина-конец сезона:** после завязывания плодов или заполнения ядра многие культуры способны переносить лёгкий или умеренный водный стресс. У некоторых фруктовых и орехоплодных культур контролируемый стресс даже может способствовать улучшению показателей урожайности и качества, таких как содержание сахара или толщина кожицы.

Знание конечной цели выращивания культуры также является важным фактором при определении наиболее подходящих стратегий управления водными ресурсами. Мэтт Йост отмечает, что перед посадкой саженцев следует учитывать ожидаемую доступность воды: если известно, что в середине сезона, например в июне или июле, водные ресурсы могут иссякнуть, планирование полива должно строиться с учётом этих ограничений.

### **Какие визуальные признаки указывают на то, что дефицитное орошение не работает?**

Не рекомендуется полагаться исключительно на визуальные признаки для определения того, получает ли культура достаточное количество воды. К тому моменту, когда растения демонстрируют стрессовые проявления, такие как задержка роста или скручивание и сморщивание листьев, может быть уже слишком поздно для коррекции полива. Более точную информацию о состоянии растений и уровне водного стресса дают метеостанции, оценивающие скорость эвапотранспирации (ЕТ), а также мониторинг влажности почвы для отслеживания состояния почвенной влаги.

При мониторинге влажности почвы ключевым аспектом является поддержание уровня влаги между полевой влагоёмкостью и постоянной точкой увядания. Мэтт Йост отмечает, что при дефицитном орошении не следует слишком приближаться к точке увядания, так как после её достижения возврат к нормальному состоянию уже невозможен. По его словам, для многих культур допустимо истощение около 50 % доступной почвенной влаги, прежде чем потребуется пополнение.

Тяжелые глинистые почвы, склонные к растрескиванию, также свидетельствуют о недостатке воды для растений. Заккария обращает внимание, что при использовании датчиков отсоединение их от почвенных частиц может давать вводящие в заблуждение или ошибочные показания влажности, что способно вызвать серьёзный стресс у растений.

Он добавляет, что многие фермеры в Калифорнии применяют комбинированные методы орошения — на основе состояния растений, скорости ET и влажности почвы — чтобы подать оптимальное количество воды для максимального улучшения здоровья растений и урожайности при одновременном сокращении общего водопотребления, а также для достижения и поддержания желаемого уровня водного стресса.

Заккария отмечает, что микроорошение широко распространено на западе США, позволяя точно дозировать воду и питательные вещества, что добавляет уровень сложности в управлении поливом. Он подчеркивает, что без тщательной калибровки легко можно переувлажнить или недоувлажнить почву, что особенно критично на стадиях роста, чувствительных к водной нагрузке. При этом чем выше ценность культуры, тем выше риск и важность точного управления водными ресурсами.

### **Баланс между риском и доходностью**

Успешное применение дефицитного орошения представляет собой процесс обучения, требующий обширных знаний и практических навыков. Мэтт Йост рекомендует обращаться к статье «Стратегии дефицитного орошения кормовых культур» из издания *Utah State University Crop Resource Extension*, а Даниэле Заккария — к статье «Дефицитное орошение для сокращения использования воды в сельском хозяйстве» из журнала *Journal of Experimental Botany* в качестве источников информации для понимания основ дефицитного орошения и снижения расхода воды в сельском хозяйстве.

Заккария подчёркивает, что перед внедрением этих стратегий фермеры должны обладать обширной информацией, причём это касается не только управляющих фермами, но и специалистов по орошению на местах. Он приводит пример собственных экспериментов по дефицитному орошению томатов для переработки: три доктора наук работали над испытанием в одиночку, однако им не удалось создать дефицит воды на глубокой глинистой почве в течение двух сезонов подряд. По его словам, на фермерских полях происходят многочисленные процессы, которые дополнительно усложняют реализацию дефицитного орошения, делая этот принцип полезным, но трудным для практического применения.

Йост добавляет, что неправильная реализация стратегии может негативно сказаться на урожае. Он отмечает случаи, когда фермеры пытались сократить расходы воды в ожидании дефицита, однако в итоге дефицита не наступило, и избыточная вода привела к потерям урожая, который мог быть получен при более сбалансированном поливе.

Его совет заключается в том, чтобы максимально использовать имеющиеся водные ресурсы. По его мнению, если вода доступна и её невозможно хранить, её следует применять, поскольку оставшаяся часть сезона может быть непредсказуемой. В других случаях, когда возможен небольшой дефицит воды в течение всего сезона, умеренное дефицитное орошение может быть эффективной стратегией для поддержания производства на протяжении всего года. Также Йост рекомендует рассматривать возможность посадки культур на ограниченной площади для уменьшения рисков.

Несмотря на сложности, связанные с внедрением дефицитного орошения, эксперты подчёркивают, что эта стратегия способна приносить значительные выгоды, особенно в периоды засухи и при ограничениях водоснабжения, устанавливаемых регулирующими органами.

## **Циркулярная биоэкономика и устойчивое сельское хозяйство как факторы трансформации мирового агропроизводства**

В исследовании отмечается, что изменение климата усугубляет проблемы, с которыми сталкиваются сельскохозяйственные системы во всем мире, включая снижение плодородия почв, нехватку воды, а также рост рисков, связанных с вредителями, болезнями и экстремальными погодными явлениями. По мере обострения этих проблем исследователи подчеркивают необходимость создания сельскохозяйственных систем, способных адаптироваться к изменениям окружающей среды при сохранении производительности.

В работе под названием «Тенденции и вызовы внедрения моделей устойчивого сельского хозяйства в условиях изменения климата: обзор» рассматриваются подходы к ведению устойчивого сельского хозяйства, которые, как утверждается, способны способствовать решению этих задач. На основе анализа мировых исследований в области моделей устойчивого сельского хозяйства авторы выделяют стратегии, способные укрепить устойчивость агроэкосистем, обеспечить защиту природных ресурсов и поддержать долгосрочную продовольственную безопасность.

## **Методы устойчивого ведения сельского хозяйства способствуют улучшению состояния почвы и повышению устойчивости экосистем**

Такие подходы, как севооборот, безотвальное земледелие, применение органических удобрений и комплексное управление почвой, признаются эффективными стратегиями для сохранения структуры почвы, улучшения удержания питательных веществ и увеличения содержания органического вещества. Авторы подчеркивают, что эти методы также способствуют биоразнообразию почвы, которое играет ключевую роль в обеспечении долгосрочной продуктивности сельского хозяйства.

В работе отмечается, что здоровые почвы имеют жизненно важное значение для устойчивых систем ведения сельского хозяйства. Благодаря улучшению состава почвы и повышению её биологической активности методы устойчивого ведения сельского хозяйства, как утверждается, увеличивают водоудерживающую способность и снижают эрозию, что позволяет сельскохозяйственным культурам лучше переносить периоды засухи или сильных дождей. В исследовании подчеркивается, что деградация почв по-прежнему остаётся одной из самых серьёзных угроз для устойчивости мирового сельского хозяйства, а неустойчивые методы землепользования в сочетании с климатическими стрессовыми факторами ускоряют процесс утраты плодородных земель во многих регионах.

В исследовании отмечается, что в современных условиях ресурсосберегающее земледелие стало одной из ключевых стратегий. Благодаря минимизации нарушения структуры почвы, сохранению растительного покрова и диверсификации систем земледелия такие методы способствуют восстановлению плодородия почвы и снижению зависимости от синтетических удобрений. Авторы подчеркивают, что ресурсосберегающие подходы также способствуют связыванию углерода, что позволяет сельскохозяйственным системам играть важную роль в смягчении последствий изменения климата.

В работе отмечается важность агроэкологических подходов, предусматривающих внедрение экологических принципов в сельскохозяйственную практику. В частности, системы агролесоводства, как указывается, сочетают выращивание деревьев с выращиванием сельскохозяйственных культур или разведением скота, способствуя повышению биоразнообразия, стабилизации состояния почв и созданию дополнительных источников дохода для фермеров за счет производства древесной и недревесной продукции. Интеграция растениеводства и животноводства представляет собой ещё одну стратегию устойчивого развития, обеспечивающую эффективную рециркуляцию питательных веществ и органических материалов в рамках сельскохозяйственных систем.

Экологически рациональные методы ведения сельского хозяйства также приносят экономические преимущества. Снижение зависимости от химических удобрений и пестицидов, как отмечается, позволяет сократить производственные затраты и одновременно повысить устойчивость сельскохозяйственных культур. Кроме того, в работе указывается, что диверсифицированные системы ведения сельского хозяйства во многих случаях обеспечивают более стабильные источники дохода за счёт распределения рисков между различными культурами и видами производственной деятельности.

### **Циркулярная биоэкономика и технологии преобразуют системы сельского хозяйства**

В исследовании отмечается растущая роль циркулярной биоэкономики в формировании моделей устойчивого сельского хозяйства. Циркулярная биоэкономика делает акцент на эффективном использовании биологических ресурсов, переработке сельскохозяйственных отходов и сокращении зависимости от невозобновляемых ресурсов. Превращение сельскохозяйственных отходов и побочных продуктов в ценные ресурсы позволяет фермерам сокращать объем отходов и одновременно создавать новые экономические возможности в сельских сообществах.

В работе указывается, что такой подход отражает более широкую трансформацию систем сельскохозяйственного производства. В отличие от традиционного подхода, ориентированного исключительно на максимальное увеличение объёмов производства, модели циркулярной биоэкономики, как утверждается, нацелены на оптимизацию эффективности использования ресурсов, минимизацию воздействия на окружающую среду и содействие устойчивому экономическому развитию. Сельскохозяйственные отходы могут повторно использоваться для производства биоэнергии, органических удобрений или кормов для животных, что позволяет создавать замкнутые системы и снижать истощение природных ресурсов.

Технологические инновации играют всё более важную роль в развитии устойчивого сельского хозяйства. Технологии точного земледелия, средства дистанционного зондирования и системы принятия решений на основе данных позволяют фермерам оптимизировать использование воды, удобрений и других ресурсов. В исследовании подчеркивается, что такие технологии обеспечивают более целенаправленное управление сельскохозяйственными культурами и почвами, повышая урожайность и одновременно снижая нагрузку на окружающую среду.

В исследовании отмечается, что технологии цифрового сельского хозяйства, связанные с концепцией «Промышленности 4.0», постепенно внедряются в системы устойчивого ведения сельского хозяйства. Датчики, спутниковые снимки и инструменты искусственного интеллекта позволяют в режиме реального времени получать информацию о состоянии почвы, погодных условиях и здоровье сельскохозяйственных культур. Авторы подчеркивают, что благодаря возможности принимать более точные управленческие решения эти технологии помогают фермерам эффективнее реагировать на колебания климата и изменения окружающей среды.

В работе также указывается, что одни лишь технологические инновации не способны решить все проблемы, стоящие перед сельским хозяйством. Исследователи отмечают, что успешное внедрение моделей устойчивого сельского хозяйства зависит от сочетания современных технологий с традиционными системами знаний, накопленными фермерскими сообществами на протяжении многих поколений. Знания коренных народов и местного населения зачастую дают ценные подсказки относительно стратегий адаптации к изменению климата, методов диверсификации сельскохозяйственных культур и технологий устойчивого землепользования.

Объединение этих систем знаний способствует созданию гибридных моделей ведения сельского хозяйства, в которых достигается баланс между технологическим прогрессом и экологической устойчивостью. Такие модели особенно актуальны для сельских сообществ с ограниченным доступом к передовым технологиям, так как они позволяют фермерам адаптировать методы устойчивого ведения хозяйства к местным условиям.

### **Политические, управленческие и социальные барьеры сдерживают широкое внедрение**

В исследовании выделяется ряд препятствий, которые, как отмечается, по-прежнему сдерживают широкое внедрение моделей устойчивого сельского хозяйства. Одной из наиболее серьезных проблем является отсутствие государственной политики, способствующей переходу к устойчивым практикам. Многие меры в области сельскохозяйственной политики по-прежнему ориентированы на максимальное увеличение краткосрочного объема производства, а не на обеспечение долгосрочной экологической устойчивости.

Финансовые ограничения представляют собой серьезное препятствие. Мелкие фермеры часто сталкиваются с ограниченным доступом к кредитам, инвестиционному капиталу и технологической инфраструктуре. Без надлежащей финансовой поддержки многим фермерам трудно внед-

рять новые методы ведения сельского хозяйства или инвестировать в современные технологии, способные повысить экологическую устойчивость и производительность.

Кроме того, исследование подчёркивает роль институциональных барьеров, которые ещё больше затрудняют переход к устойчивому сельскому хозяйству. Указывается, что неэффективные механизмы управления, разрозненная сельскохозяйственная политика и недостаточная координация между заинтересованными сторонами могут замедлять внедрение инновационных стратегий. В работе также отмечается, что во многих регионах отсутствие эффективных консультационных служб и платформ для обмена знаниями ограничивает возможности фермеров в получении информации об устойчивых методах ведения хозяйства.

В исследовании отмечается, что участие местного населения играет решающую роль в успехе инициатив по устойчивому ведению сельского хозяйства. Сельскохозяйственные системы, в которых внедрены механизмы управления с участием заинтересованных сторон, как правило, демонстрируют более высокую устойчивость и долгосрочную стабильность. Авторы подчеркивают, что, когда фермеры, местные сообщества, ученые и политики совместно участвуют в процессах принятия решений, вероятность внедрения и сохранения устойчивых методов ведения хозяйства со временем значительно возрастает.

Объединение традиционных и коренных знаний играет ключевую роль в укреплении устойчивых систем ведения сельского хозяйства. Многие традиционные методы сформировались в результате многовековых наблюдений и адаптации к местным экологическим условиям и зачастую включают подходы, способствующие рациональному использованию ресурсов, охране биоразнообразия и повышению устойчивости к изменению климата.

Модели совместного управления, учитывающие вклад различных заинтересованных сторон, способны способствовать преодолению разрыва между научными исследованиями и практическим внедрением в сельском хозяйстве. В работе указывается, что согласование государственной политики с потребностями местных сообществ и научными данными может создавать более эффективные механизмы для устойчивого развития сельского хозяйства.

## **Перспективные направления развития сельского хозяйства, устойчивого к изменению климата**

В исследовании отмечается, что переход к устойчивому сельскому хозяйству требует скоординированных действий со стороны различных секторов. Политикам необходимо разрабатывать благоприятные нормативные рамки и создавать финансовые стимулы, способствующие внедрению устойчивых методов ведения сельского хозяйства. Инвестиции в инфраструктуру сельских районов, цифровые технологии и сельскохозяйственное образование будут иметь решающее значение для того, чтобы фермеры могли внедрять инновационные решения.

Будущие исследования должны сосредоточиваться на долгосрочных полевых испытаниях, направленных на оценку эффективности методов устойчивого ведения сельского хозяйства в различных экологических и социально-экономических условиях. Понимание того, как эти методы функционируют в реальных условиях, поможет усовершенствовать стратегии по распространению устойчивого сельского хозяйства во всем мире.

### **Дополнительный полив соленой водой повысил урожайность озимой пшеницы на Северо-Китайской равнине<sup>17</sup>**

Из-за ограниченного количества пресной воды, доступной для озимой пшеницы и летней кукурузы, производство зерна в системе ежегодного двойного севооборота на низменной равнине, окружающей залив Бохайвань в Северном Китае, сильно зависит от межгодовой изменчивости осадков. Относительно обильные ресурсы соленой воды в этом регионе представляют собой потенциальный источник орошения.

Низменность вокруг залив Бохайвань, Желтое море, расположенная в восточной части Северо-Китайской равнины, является крупным зернопроизводящим районом Китая, обеспечивая 59% национального производства пшеницы и 26% производства кукурузы.

Потребление воды при ежегодном двойном посеве озимой пшеницы и кукурузы значительно превышает количество осадков, и для поддержа-

---

<sup>17</sup> Источник: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/fakty-mnenija-kommentarii/dopolnitelnyi-poliv-solenoi-vodoi-povyasil-urozhainost-ozimoi-pshenicy-na-severo-kitaiskoi-ravnine.html> Опубликовано 3.04.2026

ния стабильных и высоких урожаев этих двух культур требуется орошение.

Вода для орошения в основном поступает из глубоких подземных источников, что привело к серьезному истощению пресноводных водоносных горизонтов и вызвало серьезные экологические проблемы в этом регионе, включая снижение уровня грунтовых вод, проседание грунта, проникновение морской воды, засоление почвы и деградацию экосистемы. Впоследствии низменность вокруг этого залива была признана одним из наиболее пострадавших регионов в мире с точки зрения чрезмерной эксплуатации подземных вод.

В ответ на этот кризис внедрение политики, ограничивающей глубоководную добычу подземных вод, еще больше сократило объем пресной воды, доступной для орошения, что усугубило нехватку воды в сельском хозяйстве и поставило под угрозу региональное производство сельскохозяйственных культур.

Выявление и использование нетрадиционных водных ресурсов крайне необходимы для смягчения этого регионального водного кризиса и обеспечения национальной продовольственной безопасности. В этом контексте низменные равнины вокруг залива обладают обильными запасами мелководных соленых вод, из которых 57,3% имеют соленость 1–3 г/л, а 22,4% – 3–5 г/л, хотя используется менее 10% от общего объема соленой воды.

Кроме того, несколько исследований подтвердили, что нетрадиционные водные ресурсы, в первую очередь соленые подземные воды низкого качества и очищенные сточные воды, предоставляют реальную возможность сократить потребность в воде для орошения и могут быть использованы для выращивания сельскохозяйственных культур.

Команда исследователей Китайской академии наук поставила эксперимент, чтобы оценить влияние дополнительного орошения соленой водой в условиях дефицитного орошения на урожайность и водопродуктивность озимой пшеницы и последующей культуры — кукурузы, а также определить динамику засоления почвы и годовой солевой баланс при орошении соленой водой.

В течение двух лет (2023–2025 гг.) проводился полевой эксперимент с использованием шести вариантов орошения: I<sub>0</sub> (богарная), I<sub>f</sub> (один полив пресной водой на стадии кущения), I<sub>s</sub> (один полив соленой водой на стадии кущения), I<sub>f</sub> + I<sub>s</sub> (полив пресной водой на стадии кущения с последующим поливом соленой водой на стадии цветения), I<sub>s</sub> + I<sub>f</sub> (полив соленой водой на стадии кущения с последующим поливом пресной водой на стадии цветения) и I<sub>f</sub><sup>2</sup> (два полива пресной водой на стадиях кущения и цветения).

В качестве контрольных образцов использовались неорошаемая озимая пшеница (богарная, I0) и пшеница с одним поливом пресной водой на стадии кущения (I<sub>f</sub>).

Полив засоленными растворами увеличил объем дополнительного орошения на 70 мм, а общий объем орошения за сезон выращивания озимой пшеницы был увеличен с 0–70 мм до 70–140 мм. Полив кукурузы при посеве проводился пресной водой, без других поливов в течение вегетационного периода, в соответствии с местной практикой.

Результаты показали, что однократное орошение соленой водой (70 мм) увеличило урожайность пшеницы на 18–38% в условиях богарного земледелия и на 7–10% при ограниченном поливе пресной водой. Урожайность кукурузы не пострадала от дополнительного орошения соленой водой, проведенного в сезон выращивания озимой пшеницы.

Урожайность пшеницы, выращиваемой без орошения, была существенно ниже, чем при орошении, особенно в сезоне 2024/2025, когда количество осадков было ограничено.

Однократный полив на стадии кущения увеличил урожайность на 18,6% в сезоне 2023/2024 и на 37,7% в сезоне 2024/2025 при использовании пресной воды и на 15,6% и 30,1% соответственно при использовании соленой воды. Дополнительный полив в период цветения дополнительно увеличил урожайность на 9,2% и 14,9% при использовании пресной воды в течение двух сезонов. Варианты обработки, сочетающие пресную и соленую воду (I<sub>s</sub> + I<sub>f</sub> или I<sub>f</sub> + I<sub>s</sub>), увеличили урожайность на 7–9% по сравнению с однократным поливом пресной водой.

Хотя после орошения озимой пшеницы соленой водой в верхнем слое почвы наблюдалось накопление солей, это не повлияло на рост кукурузы, благодаря вымыванию солей во время орошения для прорастания кукурузы и концентрированным летним осадкам. В течение двухлетнего периода наблюдений в верхнем слое почвы (1 м) не наблюдалось прогрессирующего накопления солей. Эти результаты показывают, что стратегическое использование соленой воды для восполнения недостатка воды в почве может повысить урожайность при дефицитном орошении, при условии эффективного управления засоленностью почвы



Перевод: Усманова О., 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](http://sic.icwc-aral.uz)**