

# **Влияние климатических изменений на патогенные микроорганизмы растений, продовольственную безопасность и дальнейшие пути развития**

*Горепекин И.В.*

**Аннотация.** В статье изложены материалы работы «Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward» (Singh B. K. et al., 2023), опубликованной в журнале *Nature Reviews Microbiology*. Авторы исследуют текущее и будущее влияние изменения климата на биогеографию патогенов, частоту и тяжесть заболеваний, а также их воздействие на природные экосистемы, сельское хозяйство и производство продуктов питания.

## **Введение**

Во введении авторы приводят аргументы в пользу необходимости исследования влияния климатических изменений на патогенные микроорганизмы. Так, ежегодные потери урожая сельскохозяйственных культур вследствие поражения патогенами и вредителями оцениваются в 220 млрд. долларов. Это напрямую отражается на продовольственной безопасности, состоянии региональной экономики и других социально-экономических аспектов. Осложняется эта ситуациями послеуборочными потерями урожая вследствие развития патогенных микроорганизмов. Изменение климата создает предпосылки для ухудшения фитосанитарной обстановки. Существует мнение, что потенциальный рост урожайности в ближайшие полвека будет нивелирован изменением климата и последующим развитием известных и новых патогенов. Аналогичные опасения существуют и в отношении лесных экосистем. Поэтому для развития устойчивых экосистем необходимы знания о влиянии климата на взаимодействия между патогенами, растениями и связанными с ними микроорганизмами.

Изменение климата может способствовать заражению растений путем изменения эволюции патогена, взаимодействий между хозяином и патогеном; влиянием на физиологию переносчика, а также способствовать появлению новых штаммов патогенов. Другой аспект влияния климата заключается в изменении биогеографии патогенов и их хозяев, что повлечет распространение болезней на новые территории. Тем не менее, авторы отмечают, что знания о влиянии взаимодействия компонентов климата и антропогенной деятельности

на патогенные микроорганизмы в сельскохозяйственных и природных экосистемах ограничены. В частности, не поддаются количественному прогнозированию последствия развития патогенов для первичной продукции. Аналогичная ситуация отмечается в вопросе влияния относительной влажности на численность и вирулентность патогенов.

Глобализация и усиление интенсивности международной торговли за последние десятилетия способствовали перемещению патогенов сельскохозяйственных культур между континентами. Виды и сорта растений, которые не развивались одновременно с интродуцированными патогенами в новом географическом местоположении, вероятно, более уязвимы, что благоприятствовало вспышкам заболеваний. В качестве примера авторы приводят панамскую болезнь – увядание бананов, вызываемое почвенным грибом *Fusarium oxysporum f. sp. cubense*, который, предположительно, появился в Юго-Восточной Азии, а затем распространился по всему миру в течение двадцатого века.

Кроме того, климатические и экологические изменения и современные методы управления земельными ресурсами, в которых преобладают монокультуры и высокоплотные культуры, вероятно, способствовали появлению и адаптации патогенов растений вне пределов их обычного географического ареала. Например, соя и пшеница широко выращиваются в монокультурах высокой плотности, и их урожайность снижается из-за развития вредителей и патогенов. Ржавчина сои, вызываемая грибом *Phakopsora pachyrhizi*, и пятнистость пшеницы, вызываемая грибом *Zymoseptoria tritici*, являются одними из наиболее разрушительных болезней этих культур. Задokumentированные потери урожая для этих болезней во время тяжелых эпидемий были задokumentированы на уровне более 50%. Несмотря на устойчивость природных экосистем, изменения климата и связанные с ним появление и эволюция патогенов создают угрозу для продуктивности естественных сообществ. В качестве примера авторы приводят расширение

ареала патогена *Phytophthora cinnamomi*, который может оказать значительное негативное влияние на растительные сообщества во многих частях мира.

В настоящем обзоре обсуждается изменение патогенной нагрузки на растения в зависимости от климатических сценариев. Авторы исследуют текущее и перспективное влияние изменений климата и интенсификации землепользования на биогеографию патогенов, взаимодействие между микробиомом растений и патогенами растений, а также на частоту и тяжесть заболеваний растений и их коллективное влияние на сельское хозяйство и первичное производство. Кроме того, в обзоре дается анализ возможных механизмов, с помощью которых инвазия патогенов влияет на микробиом растений, и как эти знания можно использовать для снижения риска вспышек болезней посредством улучшения эпиднадзора за болезнями, прогностического моделирования и эффективных стратегий устойчивого управления. Также авторы предлагают различные подходы, сочетающие мониторинг патогенов в рамках политики для обеспечения долгосрочной устойчивости глобальной продовольственной безопасности и экологической устойчивости.

### **Изменения климата и болезни растений**

Сложность прогнозирования развития болезней растений от изменений климата трудная задача по ряду причин. К ним относятся разнообразие таксонов, распределенных по пространственным и трофическим принципам; их приспособленность и вирулентность, абиотические взаимодействия, эволюционные процессы растения и микроорганизма, биология хозяина и переносчика, а также условия окружающей среды.

Непрямой характер влияния климата на подверженность растений фитопатогенам авторы иллюстрируют следующим примером. Длительная засуха вызывает дефицит воды деревьев. В условиях стресса растения становятся более восприимчивы к заражению патогенами, в частности, что приводит к повышенной восприимчивости к заражению патогенами, такими как грибы рода *Phytophthora*.

В следующих разделах авторы обсуждают как климатические факторы влияют на вирулентность патогенов и развитие болезней.

### *Повышенная температура*

Потепление климата может существенно повлиять на аспекты популяционной динамики патогенов, такие как перезимовка и выживаемость, темпы роста популяции или количество поколений полициклических видов. Например, пониженная суточная температура сокращает латентный период возбудителя ржавчины кофейных листьев *Hemileia vastatrix*, способствуя распространению эпидемии ржавчины в Центральной Америке. Повышение температуры сокращает инкубационный период патогена, что приводит к увеличению численности патогена в течение вегетационного периода. Более высокая температура (наряду с высокой влажностью) связана с развитием фитофтороза картофеля (*Phytophthora infestans*) и стеблевой язвой рапса масличного. Повышение средних зимних температур повысило уровень заражения каштана американского грибом *Phytophthora spp.*, что привело к массовой гибели деревьев в Северной Америке. Также в 30-летнем исследовании была выявлена связь между ранним таянием снега и более частым поражением сосен фитофторозом (*Phacidium infestans*).

Изменения глобальных температур могут серьезно повлиять на распространение патогенов в сельскохозяйственных и природных экосистемах, повышая риск заражения новыми вредителями и патогенами. По прогнозам, глобальное потепление приведет к увеличению численности многих грибковых почвенных патогенов растений, что будет иметь значительные последствия для первичной продуктивности. Повышение температуры может привести к развитию новых штаммов патогенов, которые лучше адаптированы и более вирулентны. Так, тяжесть фузариоза пшеницы, вероятно, возрастет из-за перехода от более мягкой формы *Fusarium culmorum*, предпочитающей прохладные и влажные условия, к более агрессивной форме *Fusarium graminearum*, предпочитающей теплые и влажные условия. Аналогичным образом, более агрессивные и термоустойчивые новые штаммы

*Puccinia striiformis* заменили старые штаммы и вызывают крупные вспышки ржавчины пшеницы в Соединенных Штатах, Австралии и Европе.

Повышение температуры может увеличить спектр многих патогенов, которые в настоящее время ограничены требованиями к перезимовке, таких как стеблевая ржавчина пшеницы, вызываемая *Puccinia graminis f. sp. tritici*. С другой стороны, в течение 30 лет при неуклонном повышении летних температур наблюдалось локальное вымирание *Triphragmium ulmarie*, возбудителя ржавчины, поражающего *Filipendula ulmaria*. Согласно прогнозам, повышение температуры мало повлияет на другие патогены, такие как *Phytophthora infestans*, из-за их более низких тепловых предпочтений.

Причина повышенной восприимчивости растений к патогенам при увеличении температуры на молекулярном уровне остается недостаточно изученной. Повышенные температуры могут подавлять иммунитет растений, приводя к усилению заражения патогенами. Например, у арабидопсиса выработка салициловой кислоты, гормона, критически важного для защиты растений, подавляется при высоких температурах из-за нарушения активации основных факторов иммунной транскрипции, таких как СВР60g. Другой пример связан с растениями риса, у которых в тепле усиливается синтез абсцизовой кислоты и чувствительных генов, что связано с повышенной восприимчивостью к бактериальному фитофторозу. Ещё одно недавнее исследование показало, что индукция биосинтеза жасмоновой кислоты и сигнальных генов *Magnaporthe oryzae* приводит к повышенной восприимчивости риса к бластной болезни риса при высоких температурах.

#### *Повышенный уровень углекислого газа*

Различная частота заболеваний в условиях повышенных концентраций углекислого газа (CO<sub>2</sub>) предполагает зависимые от патогена и хозяина реакции на CO<sub>2</sub>. Повышенные уровни CO<sub>2</sub> увеличили степень поражения бахчевых мучнистой росой, вызываемой *Sphaerotheca fuliginea*, а также головневой фитофторозом и пятнистостью пшеницы, вызываемыми *Fusarium spp.* и *Septoria tritici*, соответственно, тогда как восприимчивость сои к возбудителю

ложной мучнистой росы *Peronospora manshurica* была снижена. Аналогичным образом изменения характеристик поверхности листьев, вызванные повышенным содержанием CO<sub>2</sub>, усилили заболевание осины ржавчиной, но снизили тяжесть заболевания бурой пятнистостью клёнов. Атмосферный CO<sub>2</sub> влияет на иммунные реакции растений и уровни гормонов, которые могут влиять на взаимодействие растений с патогенами. Например, повышенная базальная экспрессия генов, чувствительных к жасмоновой кислоте, при повышенном содержании CO<sub>2</sub> повысила устойчивость к некротрофному патогену листьев *Botrytis cinerea*, но снизила устойчивость к гемибiotрофному патогену листьев томатов *Pseudomonas syringae*. Ослабление защитных реакций пшеницы при повышенном содержании CO<sub>2</sub> усиливает её восприимчивость к патогенам *Z. tritici*, *F. graminearum* и *S. tritici*, вызывающим пятнистость, фузариоз и головневой фитофтороз. Повышенный уровень CO<sub>2</sub> влияет на трехсторонние биотические взаимодействия между вирусом желтой карликовости пшеницы, ячменя и переносчиком тли *Rhopalosiphum padi*. Заражение привело к увеличению содержания надземного азота в пшенице, растущей в условиях повышенного содержания CO<sub>2</sub>, по сравнению с незараженными растениями, тем самым снижая эффективность переносчиков и поглощение флоэмы. Повышенный уровень CO<sub>2</sub> влияет на отношения растений и патогенов, но в настоящее время не существует единой основы для понимания и прогнозирования его воздействия и последствий.

#### *Изменение доступности воды*

Колебания относительной влажности воздуха и влажности почвы входят в число основных факторов обилия и вирулентности патогенов растений, поэтому последствия изменений климата могут быть опосредованы этими факторами. Многие грибковые заболевания требуют высокой влажности для прорастания спор и инфицирования растений-хозяев. Высокая влажность обычно повышает вирулентность патогенов, поражающих аэренхиму – воздухоносную ткань растений. Показатели заражения салата-латука патогеном *Sclerotinia sclerotiorum* и возбудителем стеблевой гнили

*Phytophthora sojae* выше при повышенной влажности. Зависящая от влажности экспрессия бактериальных эффекторов, которые модифицируют иммунные реакции растений, способствует укоренению *P. syringae* в водном межклеточном пространстве (апопласте) листьев арабидопсиса. Более высокая влажность также коррелирует с увеличением выработки микотоксина дезоксиниваленола *F. graminearum*, патогена, поражающего ряд зерновых культур, что приводит к значительным экономическим потерям и снижению качества продуктов питания. Напротив, для *M. oryzae*, возбудителя blastomы риса, и *Streptomyces spp.*, вызывающих бактериальную паршу картофеля, условия с пониженной влажностью увеличивают численность патогенов и тяжесть заболевания. Недавние анализы показывают, что общее повышение относительной влажности может увеличить частоту заболеваний, вызываемых грибами.

Засуха по-разному влияет на уровень инфицирования патогенами и тяжесть заболеваний растений. Такие болезни как корневая гниль гороха (вызываемая *Aphanomyces euteiches*), белая гниль лука (*Sclerotium cepivorum*), поражение пшеницы (*Gaeumannomyces graminis var. tritici*), корончатая гниль пшеницы (*Fusarium spp.*), черная ножка капусты (*Leptosphaeria maculans*) и черная ножка виноградной лозы (*Ilionectria / Dactylonectria spp.*) усиливаются с продолжительностью и частотой засух. С другой стороны, засуха снизила степень поражения киви склеротиниозной гнилью (*S. sclerotiorum*) и красной хвоей сосны лучистой (*Phytophthora pluvialis*). Аналогичные результаты были получены для бактериального патогена винограда *Xylella fastidiosa*. В целом, некротрофии ускоряют гибель деревьев, вызванную засухой, истощая ресурсы деревьев. В то же время болезни, вызванные биотрофами, будут менее серьезными во время засухи из-за тесной связи между активностью патогенов и состоянием питания деревьев. Однако, если биотрофы способны проникать в деревья, находящиеся в состоянии стресса, они, вероятно, смогут оказывать на деревья более серьезное влияние вследствие истощения запасов углеводов, необходимых для обеспечения устойчивости деревьев к засухе.

Опосредованные засухой изменения в направлении и силе взаимодействия растений и патогенов в пределах градиента засушливости могут повлиять на расширение ареала распространения болезней в ответ на изменение климата. Например, засуха и более высокие показатели гибели деревьев в засушливых регионах ускоряют снижение заболеваемости сосновой пузырчатой ржавчиной на низких высотах, в то время как меньшее количество альтернативных хозяев на больших высотах снижает вероятность заражения, даже по мере того, как климатические условия становятся более благоприятными. Засуха также может привести к появлению новых патогенов, которые могут противостоять суровым условиям окружающей среды и воспользоваться изменениями в физиологии растений в ответ на стресс. Например, засуха способствует заражению растений нута грибовым возбудителем сухой корневой гнили *Macrophomina phaseolina*. Вызванное засухой снижение основных иммунных реакций растений усилило заражение вирусом желтой жилки картофеля и симптомы болезни желтых вен. Эти изменения еще больше модифицируют взаимодействие хозяин–вирус–переносчик (парниковая белокрылка), что приводит к усилению горизонтальной передачи вируса.

#### *Другие переменные и сценарии будущего*

Несмотря на ограниченность текущих представлений о влиянии совокупности факторов окружающей среды на взаимодействие растений и патогенов, авторы приводят в обзоре несколько исследований, в которых уделено влияние комплексному влиянию факторов окружающей среды на поражение растений патогенами. Например, аномально теплый и влажный сезон перед сбором урожая был связан со вспышкой *M. oryzae triticum*, возбудителя бластной болезни пшеницы в Бангладеш. Аналогичным образом высокая влажность и повышенная температура способствовали распространению в виноградниках патогена *B. cinerea*.

Изменение климата (например, повышение температуры и влажности почвы) может способствовать инвазии патогенов и их передаче через новые

географические зоны и ареалы хозяев. В связи с этим некоторые патогенные грибы с большей вероятностью будут распространяться в новых регионах умеренного и бореального пояса по мере повышения годовой температуры. При этом прогнозируется непропорционально высокое негативное воздействие на урожайность в Европе, Китае и некоторых странах Южной Америки.

Моделирование в сочетании с экспериментальными данными показало, что распространенность ключевых почвенных патогенов грибов, относящихся к родам *Alternaria*, *Fusarium*, *Venturia* и *Phoma*, вероятно, увеличится в условиях прогнозируемого глобального потепления. Кроме того, повторно проведенный авторами анализ опубликованных данных глобального обследования предполагает, что относительная численность некоторых важных таксонов почвенных грибов, таких как *Penicillium spp.*, тесно связана с изменениями температуры и органического вещества. Аналогичным образом с изменением климата связывают расширение ареала *Botryosphaeria dothidea* и *Neufusicoccum parvum*, что приводит к увеличению частоты и интенсивности заболеваний. И, наоборот, относительная численность других почвенных патогенов, таких как таксоны оомицоты *Phytophthora spp.* и *Pythium spp.*, может быть очень чувствительной к изменениям pH почвы, связанным с изменениями в землепользовании, и их распределение, вероятно, будет меняться в зависимости от изменения климата и интенсификации землепользования.

Глобальные сдвиги в распределении патогенов вызывают беспокойство, поскольку все больше данных свидетельствует о том, что патогены наносят больший ущерб во вновь вторгшихся регионах и новым хозяевам, чем в их родном регионе и хозяевах. В качестве примера, заболевание ясеня, вызванное грибом *Hymenoscyphus fraxineus*, наносит минимальный ущерб деревьям в Азии, где возник патоген, но подавляет ясени в Европе с момента вторжения в этот регион 30 лет назад.

Взаимодействие климатических изменений и эволюционных процессов может напрямую влиять на будущие вспышки численности патогенов. Увеличение частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений может способствовать распространению патогенов в новые районы, как в случае с ржавчиной сои, которая была занесена из Бразилии в Соединенные Штаты ураганом. Патогенные микроорганизмы растений также могут эволюционировать, заражая другие виды растений, и / или становиться более вирулентными, преодолевая химические средства защиты и устойчивость сортов. Другой вариант – эволюция в новые патогены при межвидовой гибридизации и обширных мутаций. Например, гибридный вид *Phytophthora alni* возник в результате гибридизации *Phytophthora uniformis* и *Phytophthora multiformis* и является причиной резкого сокращения популяций ольхи по всей Европе.

Таким образом, изменение климата затрудняет прогнозирование из-за возможных изменений в биологии патогена, специфичности хозяина и качества окружающей среды. Прогнозирование рисков эпидемий также осложняется взаимодействием агротехнических методов (например, агрохимикатов, орошения, разнообразия растений), доступности местных и альтернативных растений-хозяев, совместимостью и механизмами распространения патогенов (например, воздушно-капельным или трансмиссивным путем). Усиление экстремальных погодных явлений в сочетании с изменениями в землепользовании и мировой торговле, вероятно, еще больше усилят передачу патогенов и заболеваемость. Однако всё ещё ограничены представления о том, как взаимодействия между патогенами, биогеографией, хозяином и окружающей средой повлияют на борьбу с болезнями и эффективность химического, культурного и биологического контроля. Эти знания остаются ключевыми неизвестными факторами в обеспечении продовольственной и экологической безопасности для нынешнего и будущих поколений.

## **Изменение климата, микробиом растений и болезни**

Реакция микробиома растений на изменение климата также может косвенно влиять на заболеваемость. Изменение климата, по-видимому, влияет на микробиомы растений как через изменения в исходном посевном материале из насыпной почвы или ризосферы, так и через реакции хозяина, которые включают изменения в физиологии, морфологии, характере выделений и иммунных реакциях. Это важно, поскольку микробиомы, ассоциированные с растениями, оказывают сильное влияние на физиологию хозяина и способствуют регуляции его метаболизма, иммунной функции и приспособленности в новых условиях, а также играют ключевую роль в предотвращении колонизации и роста патогенов. Ряд механизмов способствует контролю патогенов микробиомом растений. Среди них модуляция иммунных реакций растений, конкуренция с патогенами за ресурсы и пространство и / или выработка противогрибковых эффекторов, литических ферментов и вторичных метаболитов (включая антибиотики, бактериоцины, токсины и сидерофоры). Растения могут использовать стратегию "крика о помощи", при которой используются химические вещества для повышения устойчивости к стрессам, вызванным вредителями. Селективное привлечение полезных микроорганизмов происходит за счет модуляции сигнальных путей между растениями и микробиомом, изменения характера выделения корней и / или выработки летучих веществ. Наиболее хорошо изученным примером защиты от болезней, опосредованной микробиотой, является почва, подавляющая развитие болезней, где активная микробиота способствует снижению заболеваемости даже в присутствии патогена, восприимчивого хозяина и благоприятных условиях окружающей среды. Сложные экологические взаимодействия и коммуникации между растениями и патогенами, между микробиомами растений и патогенами, а также между растениями и их микробиомами определяют исходы заболеваний, но конкретные механизмы коммуникаций и ответственные за них соединения остаются неясными.

Переменные изменения климата (повышенный уровень CO<sub>2</sub>, потепление и засуха) также могут увеличить выделение корней и изменить состав экссудата как у сельскохозяйственных культур, так и у деревьев, привлекая полезные микроорганизмы, которые в конечном итоге поддерживают рост растений. Патогены могут преодолевать первую линию защиты растений либо напрямую, через конкуренцию с местными микробными сообществами, либо косвенно, вызывая изменения в биологии и физиологии растений (например, экссудацию корней). Колонизирующий ксилему грибок-возбудитель сосудистого увядания *Verticillium dahliae* использует эффекторные белки с антибактериальными свойствами для манипулирования микробиотой растений и колонизации хозяина. Патогены также могут модулировать микробиом растений, изменяя защитные реакции растений. Например, подавление иммунитета патогеном грибов пшеницы *Z. tritici* вызывает колебания в сообществах микроорганизмов листьев, которые делают растение уязвимым для дальнейших инфекций. Если патогену удастся вытеснить связующий ключевой вид микроорганизмов, который облегчает взаимодействие в сообществе, вся микробная сеть может разрушиться, что приведет к серьезному ухудшению продуктивности растений. В некоторых случаях участники растительного микробиома сами могут способствовать развитию патогена посредством передачи сигналов, метаболических взаимодействий и ослабления иммунного ответа хозяина. Например, возбудитель болезни оливковых сучков, *Pseudomonas savastanoi pv. savastanoi*, обменивается сигналами, определяющими кворум, с местными непатогенными штаммами *Pantoea agglomerans* (эпифит, растет на поверхности растения) и *Erwinia toletana* (эндофит, обитает внутри растения), что приводит к увеличению колонизации и заболеваемости. Во многих случаях изменения в структуре и функциях микробиоты растений наблюдались для различных комплексов растений и патогенов. Патоген может сосуществовать с целым рядом представителей растительной микробиоты; однако пока неясно,

вносят ли наблюдаемые изменения в составе микробного сообщества вклад в колонизацию патогенов и развитие болезней.

Поскольку изменение климата может напрямую влиять на иммунные реакции растений, существует вероятность, что микробный дисбактериоз растений может способствовать инвазии патогенов. Например, вызванные изменением климата изменения в иммунной системе растений, которые подавляют инвазию патогенов, также могут негативно влиять на формирование микробиома растений. Потепление может усиливать или ослаблять иммунитет, запускаемый ассоциированным с микроорганизмами молекулярным паттерном (АММП), и подавлять иммунитет, запускаемый эффекторами растений. Аналогичным образом при потеплении и засухе снижается производство салициловой кислоты. Поскольку микробиом растений обеспечивает первую линию защиты от вторжения патогенов, изменения в его структуре и функциях могут влиять на колонизацию патогенами. Иммунитет растений (включая иммунитет, запускаемый эффекторами, иммунитет, запускаемый паттернами, РНК-интерференцию и индукцию защитных гормонов) эволюционировал не только для ограничения роста патогенов, но и для поддержания гомеостаза микробиома растений. Недавнее исследование продемонстрировало роль иммунитета, запускаемого паттерном, в предотвращении дисбактериоза в филлосфере путем регулирования структуры сообщества и численности микроорганизмов. Однако еще предстоит оценить, влияют ли изменения в структуре микробного сообщества, опосредованные иммунитетом растений, на взаимодействие растений с патогенами напрямую через смещение их общей реакции в сторону поступающего патогена или косвенно через изменения в приспособленности растений.

Хотя взаимодействия в системе «растения-микробиом-патогены», вероятно, изменятся в будущих климатических сценариях, знания для прогнозирования направлений и результатов этого развития пока ограничены. Авторы предлагают поправки к существующим концепциям (треугольник

болезней и постулаты Коха) и выступают за четкое рассмотрение микробиомов окружающей среды и хозяина в концепциях болезней, чтобы получить лучшее механистическое понимание вспышек для улучшения управления болезнями. Этому может способствовать четкое включение экоэволюционных основ в будущие исследования, что улучшит механистические знания и прогностические модели инвазии патогенов и вспышек болезней. Например, экспериментальное эволюционное исследование продемонстрировало, что взаимосвязь между растительным вирусом и его естественным хозяином может эволюционировать от патогенной к мутуалистической в условиях сильной засухи. Поскольку микробиомы играют важную роль в адаптации растений, авторы предполагают, что благоприятные взаимодействия растений и микробиома будут развиваться для максимальной приспособленности растений к комбинированному биотическому и абиотическому стрессу в будущих климатических условиях. Например, при воздействии почвенных патогенов специфичный для корней транскрипционный фактор MYB72 и  $\beta$ -глюкозидаза BGLU42 регулируют синтез и секрецию кумарина, который ингибирует патогенные микроорганизмы, но благоприятствует ризобактериям, вызывающим системную резистентность. Интересно, что накопление кумарина индуцируется осмотическим и температурным стрессами, что указывает на возможное взаимодействие 'крика о помощи' растений для селективного привлечения микробиоты для борьбы с множественными стрессами.

### **Пути развития**

В данном разделе авторы предлагают три направления по борьбе с болезнями.

*Современное сельское хозяйство, патогенные микроорганизмы и будущие стратегии смягчения последствий для устойчивого управления земельными ресурсами*

Известно, что патогенные микроорганизмы очень чувствительны к методам управления земельными ресурсами. Например, в почвах луговых угодий на четырех континентах постоянное внесение азотных и фосфорных

удобрений способствует распространению патогенных, а не мутуалистических грибов.

Традиционные подходы к борьбе с болезнями основаны на химических фунгицидах и использовании устойчивых к болезням сортов для борьбы с патогенами, но эти методы, возможно, достигли своего пика, как в случае с почвенными грибовыми патогенами, которые становятся все более устойчивыми к фунгицидам. В настоящее время отсутствуют эффективные химические средства контроля заболеваний, вызываемых широко распространенными почвенными патогенами, такими как *Fusarium* и *Verticillium spp.* Кроме того, широкое использование химических средств контроля все чаще не поощряется. Одна из причин политическая, например, "Зеленые соглашения" ЕС требуют сокращения использования химических пестицидов на 50% к 2030 году. Другая причина – требования потребителей, которые учитывают негативное влияние химических средств на биоразнообразие, включая полезные микроорганизмы, здоровье почвы и качество продуктов питания (остатки химических веществ), и, в конечном счете, на здоровье человека. Разработка экологически чистых химических веществ требует определения приоритетов, но в настоящее время они дорогостояще, а сама разработка отнимает много времени. Кроме того, среднесрочные и долгосрочные оценки показали, что химические вещества, изначально считавшиеся безвредными для окружающей среды, такие как фосфорорганические соединения и неоникотиноиды, на самом деле наносят ущерб окружающей среде.

Борьба с патогенами в природных экосистемах осуществляется с помощью различных стратегий на всех уровнях. Например, поддержание видового разнообразия в лесных экосистемах может существенно снизить инвазию патогенов растений широкого профиля. Агроэкосистемы могут перенять некоторые из этих подходов, поощряя агробиологическое разнообразие, взаимозаменяемость и регулярные севообороты культур для повышения устойчивости. Однако контроль культур с использованием

севооборотов или залежного поля является экономически сложной задачей и становится все более неэффективным, поскольку патогенные микроорганизмы становятся менее чувствительными к этим методам. В прошлом четырех или пяти севооборотов без использования хлопка было достаточно, чтобы снизить заболеваемость фузариозным и вертициллиозным увяданием на хлопководческих фермах Австралии и обеспечить прибыльное производство хлопка. Сейчас для борьбы с болезнями требуется от пяти до семи ротаций. Текущие стратегии решения этих проблем включают интеграцию генов устойчивости к болезням в сельскохозяйственные культуры путем селекции (требуется 10-20 лет для выведения новых устойчивых к урожаю сортов) и путем клонирования трансгенов или редактирования генов (требуется несколько лет, но возникают общественные и политические проблемы). В некоторых случаях устойчивость растений, опосредованную генами, можно быстро преодолеть за счет эволюции патогенов. Внедрение нехимических инструментов, таких как биологический контроль, является сложным решением с противоречивыми результатами. Таким образом, необходимы принципиально новые подходы, чтобы выйти за рамки нынешней парадигмы управления болезнями. Подходы, использующие экологические и эволюционные взаимодействия, и другие природоориентированные методы, могут стать эффективными инструментами будущего.

#### *Технические инновации для мониторинга, управления и снижения рисков заболеваний в условиях глобальных изменений*

Современные подходы к мониторингу, управлению и снижению рисков заболеваний ограничены акцентом на парадигмах с одним патогеном, одной культурой и одним заболеванием. Однако расширение исследований, включающих другие ключевые аспекты болезней, такие как ассоциированные сообщества почвенных микробов и фауны и их взаимодействие – фитобиомный подход – могут предоставить более глубокие научные знания для совершенствования инструментов прогнозирования и управления. Аналогичным образом, интеграция биологии и экологии переносчиков, а

также их реакции на изменение климата может улучшить предсказуемость и риски, связанные с трансмиссивными патогенами. Однако это нетривиальная задача, решение которой требует изменений во взглядах на болезни растений. Например, традиционные понятия, такие как треугольник болезней, выиграли бы от включения во взаимодействие хозяин–патоген новых экологических концепций, таких как почвы и микробиомы растений. Аналогичным образом, определенные заболевания могут быть вызваны множеством микроорганизмов (например, некроз сердцевины томатов, увядание виноградной лозы), и некоторые из этих микроорганизмов невозможно выделить и повторно интродуцировать, что ограничивает эффективность постулатов Коха в установлении причинно-следственных связей между микроорганизмом и болезнью.

Необходим междисциплинарный подход к пониманию биологии и экологии патогенов от молекулярных до глобальных масштабов. Интеграция имеющихся данных о биологии патогенов с данными о транспорте, торговле, климате и географии может улучшить мониторинг и способность прогнозирования заболеваемости. Этому могут способствовать биохимические сенсоры, постоянные наблюдательные центры, спутниковые инструменты и инструменты дистанционного зондирования, искусственный интеллект и привлечение фермеров и других добровольцев для получения ранних сообщений о заболеваниях, что может способствовать эффективному эпиднадзору. Местные данные могут быть использованы для прогнозирования распространения и тяжести заболевания, и их можно масштабировать до региональных и глобальных масштабов с использованием инструментов моделирования и искусственного интеллекта. Эти инструменты прогнозирования также будут способствовать оценке воздействия болезней на производство продуктов питания и другие социально-экономические показатели (рабочие места, доход, психическое здоровье), тем самым поддерживая разработку и внедрение эффективных инструментов смягчения последствий. Параллельно системы поддержки принятия решений,

основанные на подходах системной биологии, были бы эффективны для управления рисками заболеваний, эпиднадзора и прогнозирования. Такие подходы должны включать точное земледелие, новые экологически чистые химикаты и биологические препараты (например, микробиом и синтетические биологические продукты), учет генетического разнообразия хозяев и прогнозирование изменения климата для патогенов, хозяев и переносчиков. Интегрируя воздействие изменения климата на сельское хозяйство и экологию в инструменты прогнозирования, которые также учитывают социально-экономическую информацию и международные торговые пути, можно разработать более эффективную политику для эффективного управления рисками болезней растений.

Для разработки эффективных и устойчивых решений по борьбе с болезнями растений необходимы согласованные усилия, включающие технические инновации в микробиоме, синтетической биологии, точном земледелии и агроэкологических инструментах. Высокоточные сельскохозяйственные технологии, основанные на беспилотных летательных аппаратах, искусственном интеллекте и машинном обучении, могут выявлять болезни на ранней стадии и способствовать принятию эффективных и экологически безопасных целевых мер борьбы, таких как удаление растений или точное распределение химических веществ по растениям. Последние достижения в области микробиологии (например, подходы к разработке микробиома), биохимии (летучие вещества и элиситоры растений) и синтетической биологии (синтетическое микробное сообщество (SynCom)) открывают новые пути борьбы с болезнями и снижают зависимость от химического контроля. В частности, появляется интерес к использованию микробиомов растений и почвы для смягчения негативных последствий изменения климата, варьируя от прямого манипулирования микробиомами до косвенного манипулирования их функциями посредством изменений в управлении земельными ресурсами и методах ведения сельского хозяйства, а также использования инокулянтов или биохимических продуктов. Полезную

микробиоту растений можно использовать для повышения приспособленности растений, снижения нагрузки патогенами и основных сигнальных путей защиты растений. Следовательно, микробиологические средства, такие как инокулянты или разработка микробиома *in situ*, обещают оптимизировать рост растений во все более стрессовых условиях и при атаках патогенов. Выявление полезной микробиоты семян и растений, способной противостоять заражению патогенами, потенциально может стать эффективным инструментом борьбы, поскольку некоторые из этих микроорганизмов передаются по наследству или активно рекрутируются растением, и, следовательно, может повысить вероятность успешной колонизации хозяина и, в конечном итоге, устойчивость к болезням. Кроме того, в будущих программах селекции растений следует четко использовать концепцию холобионта растений (хозяин плюс ассоциированные микробиомы), чтобы гарантировать, что новые сорта смогут использовать микробные симбионты для борьбы с заболеваемостью. Такие инструменты могут сыграть важную роль в смягчении пагубных последствий патогенов для продуктивности ферм и доступности продовольствия при сценарии изменения климата. Однако необходимы систематические и скоординированные исследования для углубления понимания экологических и эволюционных процессов, лежащих в основе взаимодействия растений, связанных с ними микробиомов и инвазий патогенов, а также того, как на них влияют изменение климата, управление земельными ресурсами, агрономические методы и другие характеристики экосистем. Это необходимо делать с учетом климатической зоны, видов сельскохозяйственных культур и болезней, а также методов управления.

#### *Взаимодействие науки, политики и социальные инновации*

Болезни растений влияют на все четыре столпа продовольственной безопасности: доступ, наличие, использование и стабильность. Кроме того, болезни растений могут существенно повлиять на социально-политическую стабильность региона или страны в отсутствие эффективной политической основы для мониторинга, управления и смягчения последствий болезней.

Одним из лучших примеров является фитофтороз картофеля, который вызвал голод в Ирландии в 1859 году, вызвав гибель двух миллионов человек и массовую миграцию. Это событие стало разрушительным следствием отсутствия эффективной политики по управлению рисками, связанными с болезнями. Другие примеры включают голод и смертность, связанные с бурой пятнистостью риса в Бенгалии, Индия, и вспышку кофейной ржавчины, которая привела к снижению урожайности кофе более чем на 50% и привела к голоду, бедности и массовой миграции из Центральной Америки. Очевидно, что приоритет научно обоснованной политики по мониторингу, управлению и смягчению последствий болезней растений имеет решающее значение для поддержания социально-экономического благополучия. Поэтому для эффективной борьбы с болезнями растений авторы предлагают центр знаний и сети взаимодействия науки и политики.

### Центр знаний

Климатически обусловленные изменения ареала и появление патогенов угрожают производительности сельского хозяйства, торговле и доступу к международным рынкам. Эффективные инструменты эпиднадзора, прогнозирования и политики помогли бы снизить эти риски для продовольственной безопасности и благополучия людей. Текущий мониторинг болезней растений координируется в основном на региональном и национальном уровнях с существенными различиями между развивающимися и развитой странами. Эти различия и отсутствие международной координации препятствуют быстрому реагированию на новые возникающие или быстро распространяющиеся болезни. Для постоянного мониторинга и прогнозирования глобальных очагов важных болезней растений и их социально-экономических последствий срочно необходим глобальный подход, такой как недавно предложенная глобальная система эпиднадзора. Такая система позволила бы осуществлять мониторинг в режиме реального времени и быстро реагировать для снижения рисков новых возникающих или быстро распространяющихся заболеваний на

международном уровне, и ее можно было бы моделировать и масштабировать путем объединения существующих региональных систем эпиднадзора с национальными и региональными центрами (например, USABlight.org для мониторинга *Phytophthora infestans*). Эта сеть могла бы помочь собирать, анализировать и хранить данные, а также предоставлять фактические данные и инструменты для мониторинга и прогнозирования прогрессирования заболеваний и рисков. Эта глобальная информация имеет решающее значение для создания нормативно-правовой базы, включающей эффективные фитосанитарные и карантинные правила для международной торговли.

#### Взаимодействие науки–политики–общества

Для обеспечения эффективности таких сетей, как глобальная система эпиднадзора, потребуются создание интерфейсов наука–политика–общество (ИНПО), действующих на локальном, региональном и глобальном уровнях. При постоянном взаимодействии с другими организациями, активно работающими на стыке науки, политики и общества, эти интерфейсы обеспечивали бы оценку, мониторинг, прогнозирование и предоставление рекомендаций по политическим действиям, учитывающим науку, нетрадиционные знания (например, коренного населения и частного сектора) и социально-экономические условия. Уже действующие организации, такие как Консультативная группа по международным сельскохозяйственным исследованиям (КГМСИ) (Consultative Group for International Agricultural Research – CGIAR), были бы в выгодном положении для координации более широкой сети информации, учитывая широкую базу навыков и расположение учреждений в развивающихся странах, где необходимо собирать новые данные. При наличии соответствующего мандата и ресурсов одна КГМСИ могла бы координировать периодические оценки, прогнозирование и мониторинг болезней растений в партнерстве с Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО). Этому можно было бы способствовать за счет привлечения опыта других

организаций и мирового исследовательского сообщества, таких как Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) и Международная платформа по биоразнообразию и экосистемным услугам (МПБЭУ), которые работают над проблемами изменения климата и утраты биоразнообразия. Фактически, официальное сотрудничество с этими межправительственными органами, включая One Health, будет взаимовыгодным, позволяя КГМСИ использовать их данные, ресурсы и модели для прогнозирования заболеваемости, связанной с изменением климата, утратой биоразнообразия и последствиями для здоровья растений и человека. Подобно пандемии COVID-19, в условиях глобализации экономики и рынка торговли передачу патогенов растений трудно контролировать или ограничить в конкретном регионе. Таким образом, необходимы глобальные усилия для управления социально-экономическими рисками, связанными с вероятным увеличением вспышек болезней растений, особенно в странах с низким уровнем дохода. Борьба с болезнями растений в развивающихся странах не только снизит риск передачи инфекции в эти районы, но и будет способствовать обеспечению местных сообществ продовольствием и работой, что потенциально может привести к сокращению нелегальной миграции и национальных или региональных конфликтов.

### **Заключение и перспективы**

В заключении авторы отмечают, что в текущем исследовательском обзоре не хватает некоторых ключевых фундаментальных знаний для использования новых инструментов управления рисками заболеваний. Комплексное решение потребует значительного расширения текущих знаний за пределы мониторинга заболеваний и химического контроля. Необходимо улучшить понимание биологических, экологических и эволюционных реакций патогенов, переносчиков и хозяев на изменение климата. Это должно включать идентификацию патобиомов (группы микроорганизмов и беспозвоночных, которые способствуют или препятствуют заражению и прогрессированию заболеваний) и их реакцию на изменение климата. Использование

существующих экологических теорий (например, теории инвазии; сосуществующей теории / сетевой теории объединения микробиомов) может обеспечить прочную основу для изучения и прогнозирования передачи патогенов в новых регионах или новым хозяевам, а также того, как они взаимодействуют с микробиомами хозяина и почвы. Аналогичным образом, интеграция эволюционных процессов (например, приобретение патогенами нового фенотипа или местной микрофлорой посредством горизонтального переноса генов или мутаций) может продвинуть фундаментальные знания о механизмах патогенности. Также необходимо более глубокое понимание фенологии растений (изучение сезонных изменений в растениях) и взаимодействия с болезнями. Разные виды растений уязвимы к патогенам на разных стадиях роста растений. Например, патогены *Fusarium* и *Verticillium* поражают хозяина в основном на ранних стадиях роста, вызывая увядание. Аналогичным образом, при многих заболеваниях (например, мучнистой росе виноградной лозы и клубники) молодые листья более восприимчивы к заражению патогенами, чем зрелые. Учитывая, что изменение климата, вероятно, повлияет на рост и фенологию растений, нам необходимо рассмотреть, как эти изменения могут повлиять на восприимчивость растений к болезням, чтобы разработать целенаправленные стратегии борьбы с болезнями.

Измерение перемещения патогенов через воздушные и водные системы необходимо для прогнозирования нагрузки патогенов в результате вызванных изменением климата изменений погоды, направления ветра и экстремальных погодных явлений. Следует также учитывать индивидуальное и интерактивное влияние климатических факторов, таких как температура, осадки и засуха, на проявление болезней и их взаимодействие в различных климатических зонах. Для достижения этой цели можно использовать постоянные наблюдательные пункты для мониторинга загрязняющих веществ и микроорганизмов, а также технологии беспилотных летательных аппаратов, способных брать пробы на высоте 100 м над землей. Необходимы более совершенные инструменты для

наблюдения за болезнями и борьбы с ними. Дистанционное зондирование и беспилотные летательные аппараты, усовершенствованные сенсорные технологии (например, анализ метагеномов или летучих веществ) и популяционная геномика наряду с интеллектуальным анализом данных социальных сетей могут быть дополнены более точными данными для улучшения эпиднадзора за болезнями. Существует потребность в усовершенствованных инструментах моделирования, которые объединяют климатические, погодные, эпидемиологические и социально-экономические модели для прогнозирования будущих вспышек и эффективного управления рисками. Важно отметить, что основное внимание уделяется болезням технических культур, однако роль диких и местных растений, которые могут выступать в качестве альтернативных хозяев или барьеров для распространения патогенов, в распространенности заболеваний остается недостаточно изученной. Изменение климата, вероятно, повлияет на изменение ареала распространения диких растений, и как это повлияет на болезни растений и эпидемии, неизвестно. Также ограничено понимание того, как микробиомы, ассоциированные с растениями, которые играют решающую роль в прогрессировании или ограничении распространения заболеваний, будут реагировать на изменение климата и последствия для патогенных инфекций. Наконец, для обеспечения эффективного мониторинга болезней растений и борьбы с ними необходимо учитывать социально-экономические аспекты. Внедрение новых эффективных вычислительных информационных систем, которые помогают организациям в принятии решений (системы обнаружения или поддержки принятия решений), должны быть удобными в использовании и доступными для мелких фермеров, которые могут не разбираться в технологиях. Для внедрения новых подходов, обладающих большей прогностической способностью и более эффективными рекомендациями по управлению, потребуются простые в использовании инструменты и серьезная подготовка. В этом отношении приложения на базе мобильных телефонов могли бы стать полезным инструментом, поскольку

большинство людей знакомы с их работой. Отсутствие внедрения новых инструментов остается серьезной проблемой, в основном из-за низкой способности прогнозирования. Однако ученые-аграрии могли бы применить подход, аналогичный прогнозированию погоды, который в значительной степени принят большинством заинтересованных сторон, включая фермерские сообщества. В целом, сотрудничество с социально-экономическими и поведенческими науками может способствовать разработке стратегий, способствующих более широкому внедрению всех этих инструментов, таких как субсидии и / или страхование на случай неурожая.

Имеющиеся научные данные и имитационные модели свидетельствуют о том, что по мере усиления изменения климата нагрузка на растения от болезней значительно возрастет, что негативно скажется на безопасности пищевых продуктов и устойчивости природных экосистем. Поскольку масштабы и механизмы этих воздействий остаются в значительной степени неопределенными, эффективный мониторинг патогенов растений и управление ими должны быть одним из высших приоритетов для сведения к минимуму заболеваний, обеспечения безопасности пищевых продуктов и экологической устойчивости, а также содействия улучшению социально-экономических результатов. Это осложняется пробелами в научных знаниях об экологической и эволюционной реакции патогенов, хозяев и переносчиков на изменение климата, а также о передаче и появлении новых патогенов в условиях увеличения интенсивности и частоты экстремальных погодных явлений и международной торговли. Авторы предлагают внести поправки в существующие концепции (треугольник болезней и постулаты Коха) и включить эколого-эволюционные теории для улучшения механистического понимания и прогнозирования вспышек болезней в будущих климатических условиях и в новых регионах. Согласованные усилия по интеграции и использованию новых инструментов (например, геномики, спутниковых технологий, цифровых технологий, больших данных, машинного обучения) для раннего выявления, мониторинга и прогнозирования вспышек

заболеваний позволят вести устойчивое управление болезнями на местном и глобальном уровнях. Это нетривиальные цели, которые потребуют скоординированных исследований и политических действий со стороны соответствующих организаций всех уровней. Авторы считают, что создание специализированного центра знаний КГМСИ в партнерстве с существующими межправительственными органами в контексте программы "Единое здоровье" могло бы помочь достижению этих целей. Для улучшения обнаружения, мониторинга и управления патогенами растений в условиях изменения климата важно, чтобы заинтересованные стороны (организации, финансирующие исследования, директивные органы, межправительственные агентства) во всем мире обязались выделять больше ресурсов на исследования и КГМСИ.

Подробнее с результатами исследования можно ознакомиться по ссылке:

<https://www.nature.com/articles/s41579-023-00900-7>

Singh B. K. et al. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward //Nature Reviews Microbiology. 2023. V. 21. №. 10. P. 640-656.