

УДК 911.52

ОЦЕНКА РИСКОВ РАЗВИТИЯ ПАТОГЕНОВ ПШЕНИЦЫ ОЗИМОЙ
В ЛАНДШАФТНЫХ ПОЯСАХ АРМЕНИИ
С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

И. И. СЕРЕДА *

Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения

В условиях выраженной высотной поясности, а также наблюдаемой аридизации климата в Армении фенологические особенности и фитопатологические риски для зерновых культур могут меняться.

Целью данного исследования является оценка влияния ландшафтной поясности и современных климатических трендов на пространственно-временное распределение риска развития основных грибковых патогенов пшеницы озимой (желтая ржавчина, бурая ржавчина, септориоз, мучнистая роса, пиренофороз). Для этого были определены регулярные зоны возделывания зерновых культур, охарактеризованы их фенологические особенности в различных физико-географических условиях, а также составлены картографические материалы с рисками возникновения указанных патогенов.

В исследовании показано, что высота определяет асинхронность фенологических сроков. Потепление и снижение увлажнения сопровождаются ускорением сезонного развития и перераспределением рисков: в низкогорьях риск в среднем снижается, тогда как в среднегорных поясах – возрастает. Сделан вывод о необходимости более раннего и зонально приоритизированного фитосанитарного мониторинга.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2026.60.1.050>

Keywords: winter wheat, phytosanitary risk, wheat rusts, septoria tritici blotch, powdery mildew, tan spot, climate change, landscape belts, phenology, risk mapping, remote sensing.

Введение. Зерновые культуры составляют основу рациона человечества, обеспечивая значительную долю глобального суточного потребления калорий, и остаются ключевым источником пищевой энергии и растительного белка. В связи с ростом населения и ограниченностью земельных и водных ресурсов повышение устойчивости и продуктивности зерновых агросистем рассматривается как одно из наиболее результативных направлений удовлетворения будущего спроса на продовольствие без дальнейшего расширения сельскохозяйственных угодий [1]. Следовательно, поддержание стабильного производства зерна и снижение факторов, ограничивающих урожайность, напрямую связано с задачами продовольственной безопасности.

* E-mail: igor.sereda@cens.am

По статистическим данным, на 2022 г. в Армении зерновые культуры занимали более 44% посевных площадей, более половины которых приходилось на пшеницу озимую [2]. Вместе с тем, согласно данным Евразийского центра по продовольственной безопасности, в 2020 г. самообеспеченность Армении пшеницей составляла около 24% [3], что отражает выраженную зависимость от импорта. В прикладных оценках продовольственной устойчивости нередко рассматриваются ориентиры самообеспеченности зерном на уровне порядка 80% и выше, как позволяющие покрывать внутренние потребности и снижающие риски, связанные с глобальными кризисами [4, 5]. В этой связи повышение внутреннего производства зерновых культур, включая пшеницу озимую, является для Армении актуальной задачей.

Одним из элементов поддержки и повышения продуктивности зерновых агроценозов является фитопатологический контроль. Патогены пшеницы озимой способны приводить к потерям урожая порядка 15–20% (в отдельные годы и при эпифитотийном развитии – выше). Наиболее распространенные грибковые листостеблевые заболевания при превышении экономических порогов вредности часто требуют повторных обработок фунгицидами для сдерживания эпидемического процесса [6]. При этом интенсификация химической защиты сопряжена с ростом экологической нагрузки на агроландшафты, включая риски для почвенных экосистем и качества поверхностных и подземных вод [7, 8].

Для Армении, характеризующейся выраженной высотной поясностью и контрастами увлажнения и температурного режима, формируется мозаика агроклиматических условий, в которых в отдельные сезоны в некоторых ландшафтных поясах создаются благоприятные предпосылки для развития листостеблевых болезней [9]. В посевах пшеницы озимой на территории Армении наиболее значимыми по распространению и потенциальной вредности являются желтая ржавчина (*Puccinia striiformis*), бурая (листовая) ржавчина (*Puccinia triticina*), септориоз (*Zymoseptoria tritici*) и мучнистая роса (*Blumeria graminis*); несколько реже отмечается желтая пятнистость (*Pyrenophora tritici-repentis*) [10–14]. В настоящей работе указанные патогены рассматриваются как приоритетные объекты оценки фитосанитарных рисков в условиях пространственной неоднородности агроклиматических факторов.

Эпидемическое развитие болезней зерновых реализуется при совпадении восприимчивых фенологических фаз, наличия источников инфекции и погодных условий, прежде всего благоприятных температуры и продолжительности увлажнения. На микроклимат дополнительно влияют густота посева и содержание азота в почве, а на инфекционный фон – севооборот и обработка почвы [15]. Высотная поясность Армении формирует контрасты теплового и водного режимов и сдвиги фенологии, поэтому очаги могут возникать асинхронно по высотному градиенту и при благоприятном переносе спор приводить к последовательному вовлечению зон, различающихся по высоте и режиму увлажнения [16].

Армения – горная страна с выраженной высотной поясностью и ограниченными сельхозземлями, поэтому климатические изменения в ней проявляются пространственно неоднородно, а риски для водных ресурсов и

агросистем могут усиливаться даже при умеренных изменениях метеорологических условий [17]. По данным Четвертого национального сообщения Республики Армения по изменению климата, среднегодовая температура воздуха увеличилась примерно на 1,23°C в период 1929–2016 гг., а сценарные оценки к 2100 г. указывают на тенденцию к снижению годовых сумм осадков порядка 8% при сохраняющейся региональной неоднородности изменений [18]. Совокупность указанных факторов может приводить к перераспределению условий, благоприятных для развития листостеблевых заболеваний, по ландшафтными поясам и сезонам.

В современных исследованиях для ряда патогенов, таких как септориоз, подчеркивается совместная роль генотипа растения, особенностей популяции возбудителя и условий среды, что обосновывает риск-ориентированные модели, привязанные к метеопараметрам и фенологии [19, 20]. Аналогично, для желтой пятнистости в сухостепных и континентальных регионах развиваются подходы, объединяющие полевые оценки, анализ устойчивости и пространственное сопоставление риска, что соответствует задачам зонирования по ландшафтными поясам [21]. Практически это реализуется в системах поддержки принятия решений, оценивающих “инфекционные периоды” и потенциальную тяжесть поражения для оптимизации фунгицидных обработок и снижения избыточного применения при сохранении контроля болезни [22, 23].

Параллельно развиваются пространственные методы картографирования риска: для желтой ржавчины показано, что сочетание климатических и пространственных предикторов позволяет выделять зоны повышенной пригодности и отслеживать их динамику, что важно в условиях изменения климата [24, 25]. Это согласуется с обобщающими оценками значимости грибковых болезней пшеницы и потерь урожая [6, 26]. Отдельный блок работ использует дистанционное зондирование и машинное обучение для выявления симптомов и оценки тяжести поражения, где демонстрируются перспективы гиперспектрального мониторинга и построения чувствительных индексов и моделей [27–31].

В совокупности эти результаты задают основу для исследований, учитывающих ландшафтную неоднородность, фенологические сдвиги и климатические тренды, при обязательной региональной адаптации и калибровке моделей по данным наблюдений и картам зон возделывания культуры.

Цель настоящего исследования – оценить влияние ландшафтной поясности и современного тренда климатических изменений в Армении на пространственно-временное распределение рисков развития грибковых листостеблевых болезней зерновых культур на примере пшеницы озимой. Для достижения цели предполагается:

- 1) локализовать зоны регулярного выращивания зерновых культур на территории Армении с использованием данных дистанционного зондирования;
- 2) охарактеризовать физико-географические и фенологические особенности развития посевов в пределах основных ландшафтных поясов;
- 3) оценить и картографировать риски возникновения основных грибковых листостеблевых патогенов пшеницы озимой;

4) проанализировать потенциальные изменения распределения указанных рисков в контексте современных климатических трендов.

В отличие от работ, где фитосанитарный риск оценивается на уровне отдельных полей, хозяйств или административных единиц, в настоящем исследовании он рассматривается в логике ландшафтно обусловленной неоднородности территории. Для Армении с выраженной высотной поясностью и резкими градиентами увлажнения и температуры именно ландшафтные особенности задают наиболее интерпретируемую основу зонирования, связывая риск с физико-географическими факторами и фенологическими сдвигами культуры [32]. Такой подход повышает прикладную ценность результатов, обеспечивая более обоснованное планирование мониторинга и приоритизацию профилактических мер по зонам.

Материалы и методы исследования.

Определение участков произрастания зерновых культур. Выделение территорий, где по многолетним данным регулярно выращиваются зерновые, является ключевым этапом исследования: это ограничивает анализ зонами устойчивого сельскохозяйственного использования, снижает влияние нерелевантных земельных классов и смешанных пикселей, а также повышает сопоставимость результатов по годам и ландшафтными поясам.

В качестве основы для выделения зерновых культур на территории Армении использован набор ESA WorldCover 10 m v100 (ESA) [33], классифицирующий земную поверхность с разрешением 10 м на 11 классов, включая “cropland” (сельскохозяйственные земли). Набор был обрезан по границе Армении, класс “cropland” преобразован в бинарную маску и далее векторизован. Сопоставление с картами “Земельные угодья”, “Структура посевных площадей”, “Зерновые культуры” атласа сельского хозяйства Армянской ССР [34] показало удовлетворительное соответствие полученного слоя созданным ранее картографическим материалам.

Затем в Google Earth Engine [35] были сформированы временные ряды NDVI по данным MODIS за 2000–2025 гг. (8-дневные композиты, 250 м). Пересечение этих рядов со слоем сельскохозяйственных земель позволило получить набор пикселей общей площадью 3160 км² с многолетней сезонной динамикой NDVI, относящихся к пашне. Однако мелкоконтурность землепользования в Армении приводит к смешению нескольких полей в пределах пикселя 250 м, что ограничивает детальную идентификацию культур и позволяет уверенно говорить главным образом о высокой доле зерновых в составе пашни. Для задач регионального уровня такое обобщение является приемлемым.

Для выделения зерновых ряды NDVI кластеризовались в Python методом Уорда [36] после сглаживания фильтром Савицкого–Голея [37]. Для каждого года 2000–2025 гг. подбирались 5–10 кластеров, которые интерпретировались по форме медианной кривой NDVI и внутрикластерному разбросу. Зерновые определялись по паттерну: быстрый рост NDVI в начале сезона, ранний пик и резкий спад. Остальные кластеры к зерновым не относились (рис. 1). Пиксели, классифицированные как “зерновые” не менее 20 раз за 2000–2025 гг., были приняты как маска зерновых культур Армении и использованы для расчета

климатических и морфометрических показателей, характеризующих физико-географические условия и различия фенологического развития посевов пшеницы озимой.

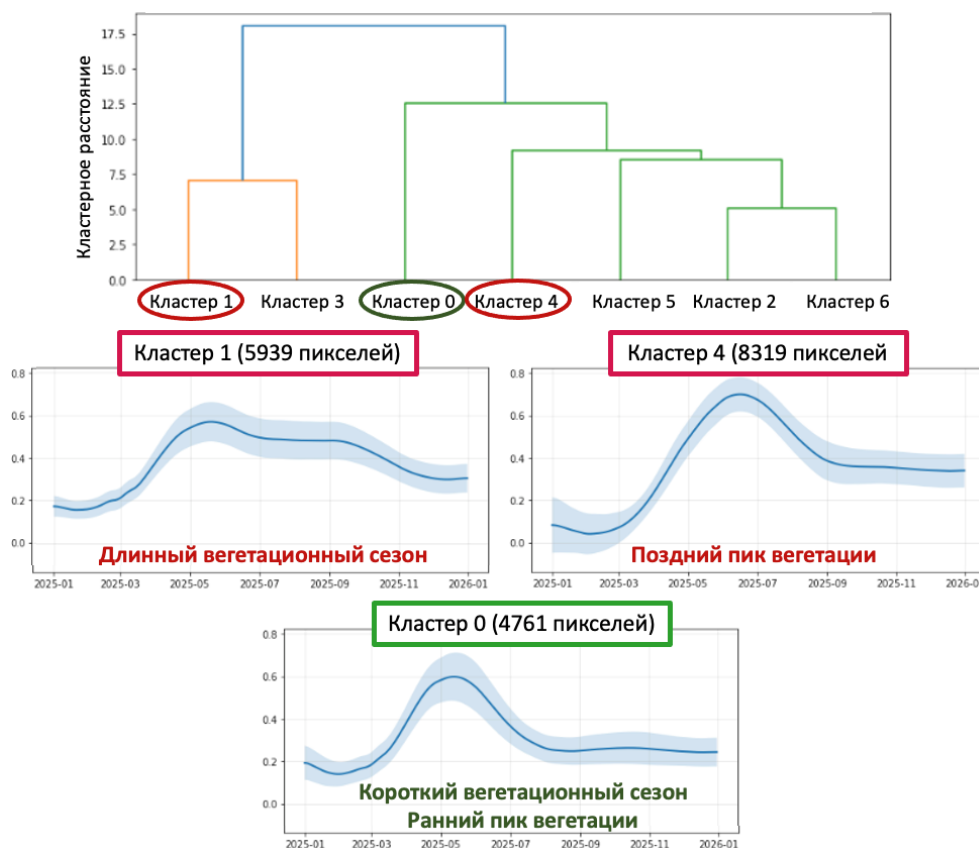


Рис. 1. Иерархическая структура 7 кластеров сельскохозяйственных земель Армении (метод Уорда [36] по центроидам). Кластер 0 определен как зерновые культуры. Физико-географические и фенологические особенности произрастания зерновых культур.

Для оценки влияния природных факторов на развитие пшеницы озимой рассматривались морфометрия (высоты, углы склонов, экспозиция), почвы (типы, поясность) и климат (температура, осадки, солнечная радиация). Растительность, животный мир, степень антропогенного влияния и современные процессы не анализировались, поскольку пашня является природным объектом с исключительно высокой степенью антропогенного воздействия.

В настоящем исследовании используются два взаимодополняющих понятия: ландшафтные пояса и природно-территориальные комплексы (ПТК). Ландшафтные пояса рассматриваются как крупные единицы природной дифференциации территории Армении, отражающие закономерную смену природных условий в связи с высотной поясностью. Вместе с тем для целей оценки риска развития патогенов озимой пшеницы одной лишь поясной дифференциации недостаточно, поскольку фитопатологическая ситуация

определяется собственным сочетанием климатических, орографических, почвенных и других факторов. В связи с этим в работе дополнительно выделяются ПТК – территориально целостные участки, в пределах которых предполагается относительная однородность условий формирования фито-патологического риска. В отличие от ландшафтных поясов, ПТК могут объединять участки разных поясов, если они характеризуются сходным сочетанием факторов, значимых для развития патогенов.

Границы ландшафтных поясов и типов почв были взяты из каталога Sustainable Caucasus (GeoNode-портал UNEP/GRID-Geneva), координируемого Женевским университетом [38]. Фенологические изменения зерновых культур (даты начала и пика сезона) оценивались по индексу NDVI, хорошо коррелирующему с объемом фотосинтетически активной фитомассы – одним из основных показателей развития растений [39]. Для расчетов использовался следующий алгоритм.

По данным MODIS (8-дневные безоблачные композиты) NDVI переводился в физические единицы и ограничивался диапазоном $-0,2-1,0$. Затем применялась маска качества, добавлялся слой с номером дня года (DOY), а параметры рассчитывались по каждому году периода 2000–2025 гг. В качестве даты максимального развития растительности (POS) принимался день года с максимальным NDVI. Дата начала сезона (SOS) определялась как день с минимальным NDVI до достижения пика. Для каждого пикселя рассчитывалась длительность активного вегетационного роста (GOS) как разность POS и SOS, а также амплитуда сезонных изменений. Пиксели исключались при недостатке наблюдений, неустойчивом росте, малой амплитуде или отрицательной длительности сезона. Затем формировались годовые изображения SOS, POS, GOS, по которым получали средние значения и стандартные отклонения фенологических показателей.

Морфометрия оценивалась по ALOS AW3D30 (JAXA) [40] (~30 м): рассчитывались высота, угол наклона и экспозиция в пределах групп пикселей по типам ландшафтов и почв. Для каждого участка вычислялись квантили 5, 25, 50, 75, 95% и среднее значение, что позволяло описать средние, типичные и крайние условия рельефа и его неоднородность. Для всех данных строились гистограммы по ландшафтным поясам, типам почв и морфометрическим диапазонам агроклиматических справочников [41].

Расчет климатических трендов. Тренды климатических изменений, приведенные в Четвертом национальном сообщении Республики Армения (увеличение среднегодовой температуры воздуха и снижение годовых сумм осадков; общая аридизация) [18], были проверены и продолжены с учетом данных 2017–2025 гг. отдельно по ландшафтным поясам. Для этого по векторизированным пикселям маски зерновых культур были сформированы суточные ряды по ERA5-Land (ECMWF) [42] за 2000–2025 гг. Анализировались температура воздуха, относительная влажность, дневная сумма осадков и фотосинтетически активная радиация. Суточные значения получали агрегацией почасовых данных. Относительная влажность на 2 м вычислялась по температуре воздуха и точке росы по стандартной аппроксимации давления насыщенного водяного пара [43] (с ограничением 0–100%), температура

переводилась из K в $^{\circ}\text{C}$ и усреднялась за сутки, осадки суммировались в мм , приходящая радиация суммировалась в $\text{МДж}/\text{м}^2$, а фотосинтетически активная радиация оценивалась как 48% коротковолновой радиации [44].

Картографирование рисков возникновения патогенов пшеницы озимой.

Собранные материалы использованы для геоэкологического районирования и картографирования рисков возникновения патогенов пшеницы озимой. Развитие всех рассматриваемых патогенов определяется сочетанием ландшафтных и погодных условий. Для них характерны высокая влажность и умеренные температуры (табл. 1). На основе благоприятных погодных условий и методик определения фенологических стадий пшеницы [41, 50] выделялись регионы Армении с повышенным эпидемиологическим риском. Оценка проводилась по данным 2019–2023 гг. для интервала от позднего кущения до колошения. При наличии благоприятных условий фиксировалась угроза эпидемии. Риск считался высоким (угроза наблюдалась все 5 лет), средним (не каждый год), и низким (отсутствие благоприятных условий).

Таблица 1

Благоприятные погодные условия для развития патогенов пшеницы озимой [45–49]

Болезнь	Оптим. температура, $^{\circ}\text{C}$	Оптим. влажность, %	Влияние осадков	Влияние жары	Влияние засухи
Желтая ржавчина (<i>Puccinia striiformis</i>)	+10–15	80–100	важны как увлажнение для заражения	негативное влияние, при $T > 25^{\circ}\text{C}$ развитие замедляется	сухая погода подавляет эпидемию
Бурая ржавчина (<i>Puccinia triticina</i>)	+15–22	60–90	повышают риск; при влажных теплых ночах риск высокий	хорошо развивается при умеренно теплой погоде	выживает, но развитие замедляется
Септориоз (<i>Zymoseptoria tritici</i>)	+15–20	85–100	дожди критично важны	может развиваться, если высокая влажность	засуха сильно подавляет
Мучнистая роса (<i>Blumeria graminis</i>)	$\cong +15$	50–80	сильные дожди обычно снижают риски	$>25^{\circ}\text{C}$ часто угнетает развитие	выживает при засухе
Приенофороз (<i>Pyrenophora tritici-repentis</i>)	+20–28	70–90	повышают риск возникновения	хорошо переносит жару при достаточном увлажнении	может выживать при умеренной засухе

Результаты и обсуждение. Алгоритм детектирования зерновых был применен ко всей территории Армении за 2000–2025 гг. Построенные карты показывают сравнительно стабильное размещение зерновых. Наиболее устойчивые зоны приурочены к горно-степным ландшафтам межгорных вулкано-

тектонических котловин марзов Ширак, Арагацотн, Котайк и Гегаркуник (в т.ч. район г. Варденис), а также к долине р. Воротан; результаты согласуются с архивными материалами [34] (рис. 2). Интерпретацию ограничивают смешанные пиксели MODIS (250 м) и критерий устойчивости (≥ 20 лет): первый может включать нецелевые типы пашни, а второй – недоучитывать реально возделываемые участки с вариативной структурой культур.

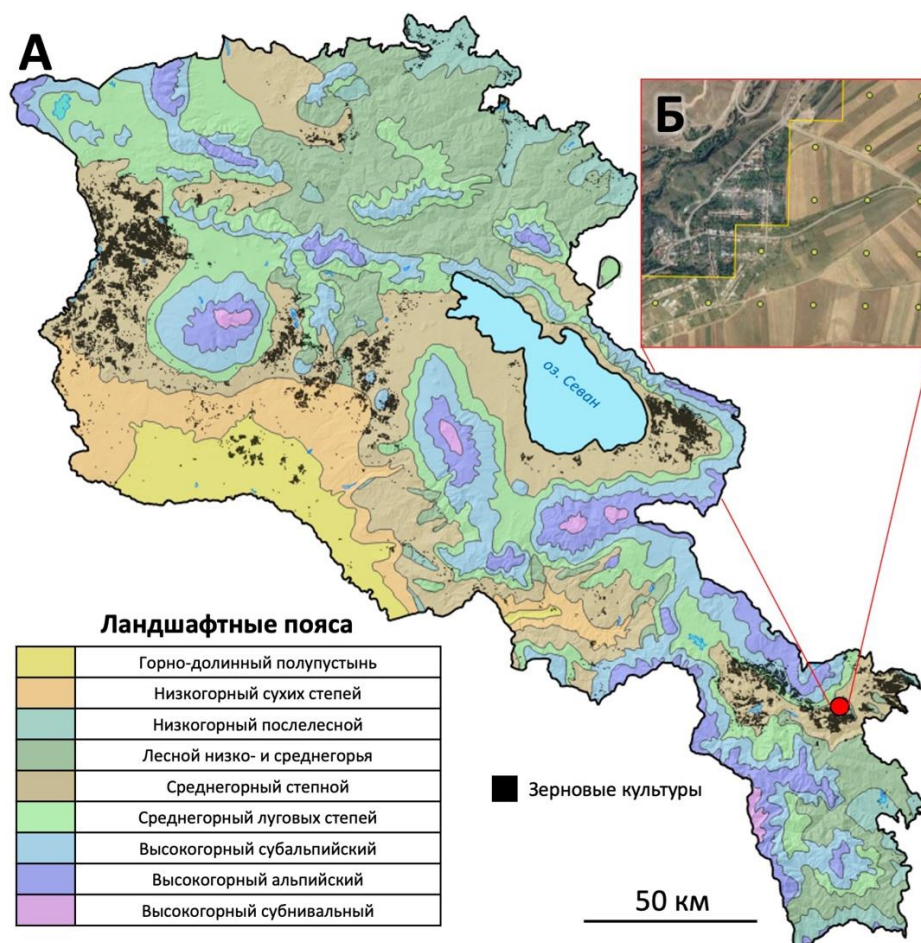


Рис. 2. А) Участки выращивания зерновых культур в период 2000–2025 гг. в различных ландшафтных поясах Армении; Б) участок сельскохозяйственных земель на снимке сверхвысокого разрешения с центрами пикселей, классифицированных как зерновые.

Результаты оценки влияния компонентов природной среды на особенности фенологического развития зерновых культур следующие.

Среди морфометрических факторов статистически значимо на фенологию зерновых влияет только высота. Уклон и экспозиция значимых различий не показали, поскольку посевы обычно расположены на уклонах $<1^\circ$ и почти никогда $>3^\circ$. С ростом высоты (400–2400 м) даты начала и пика вегетации смещаются на более поздние сроки, а продолжительность роста сокращается.

При этом пиковый NDVI снижается при подъеме на 1000–1200 м, затем возрастает (вероятно, из-за орошения в долинах, смешения пикселей и роста увлажнения с высотой). Основная часть зерновых сосредоточена на высотах 1400–2000 м, где наиболее благоприятны влагообеспеченность и сезонная сумма активных температур (рис. 3).

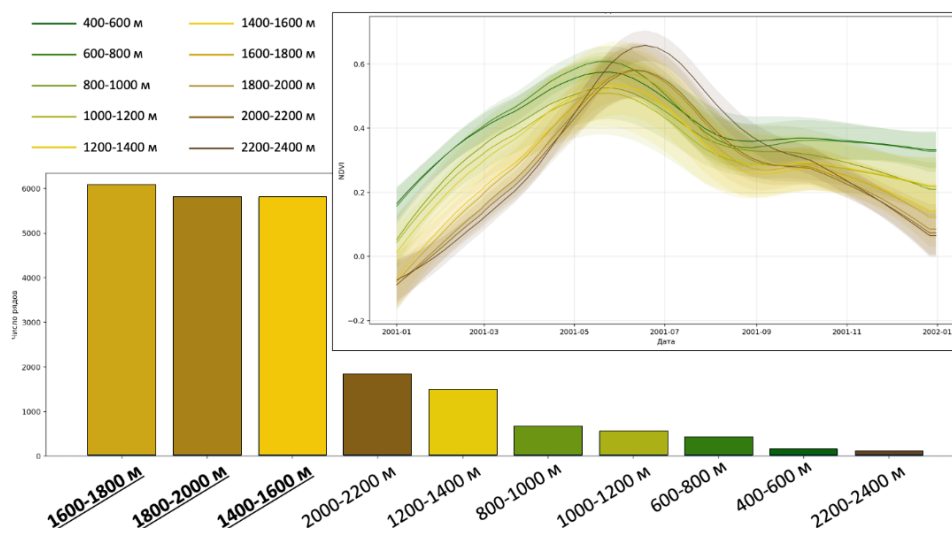


Рис. 3. Распределение сезонной динамики NDVI по абсолютным высотам.

Среди почв преобладают горно-степные типы (горные карбонатные и типичные черноземы с участием слаборазвитых черноземов умеренно увлажненных степей, горно-флювиальные почвы сухих степей). Фенология по почвам в целом следует высотной поясности. Горно-степные почвы отличаются более усредненными параметрами: вегетация начинается несколько позже, но сезон остается достаточным для вызревания, а пик развития сохраняется высоким. На уровне ландшафтных поясов наибольшая площадь зерновых сосредоточена в степном поясе. Фенологическая картина по NDVI в целом соответствует почвенным различиям, при этом продолжительность вегетации важнее максимума NDVI и его амплитуды. Сроки развития по поясам приведены в табл. 2.

Результаты оценки вероятности возникновения патогенов по марзам Армении представлены в табл. 3. Она отражает климатическую пригодность, а не гарантированное развитие болезни. Мучнистая роса приурочена к более прохладным и увлажненным районам. Бурая ржавчина тяготеет к среднегорным ландшафтам (Котайк, Арагацотн, Гехаркуник), но ее распространение возможно по всей Армении. Желтая ржавчина чаще встречается в прохладных низкогорных регионах (Лори, Тавуш, Ширак) и редко на юге. Септориоз чаще характерен для севера, он менее требователен к низким температурам, чем желтая ржавчина, но более требователен к увлажнению, поэтому в Шираке риск определялся не ежегодно. Угроза желтой пятнистости (пиренофороза) сильно зависит от ошибок севооборота и может возникать в любом регионе, но максимальна в Арагацотне, Гехаркунике, Котайке, Шираке и Сюнике.

Таблица 2

Средние многолетние (2000–2025 гг.) сроки наступления фенологических фаз развития зерновых культур по ландшафтными поясам Армении по данным дистанционного зондирования

Ландшафтные пояса	Начало вегетации			Пик вегетации		
	средняя дата	СКО (σ), дней	NDVI	средняя дата	СКО (σ), дней	NDVI
Горно-долинный полупустынь	28 янв.	14,8	0,2	19 май	13,0	0,66
Низкогорный сухих степей	1 фев.	13,9	0,1	19 май	7,3	0,58
Низкогорный послелесной	6 фев.	17,5	0,3	24 май	14,0	0,69
Лесной низко- и среднегорья	7 фев.	17,0	0,2	26 май	9,0	0,73
Среднегорный степной	9 фев.	16,0	0,1	4 июнь	8,5	0,75
Среднегорный луговых степей	13 фев.	13,8	0,1	5 июнь	8,0	0,73
Высокогорный субальпийский	15 фев.	15,9	0,1	4 июнь	8,1	0,73

Таблица 3

Степень эпидемиологической угрозы для пшеницы озимой от различных патогенов за период 2019–2023 гг.

Регион	Патогены пшеницы озимой				
	желтая ржавчина	бурая ржавчина	септориоз	мучнистая роса	желтая пятнистость
Арагацотн	средняя	высокая	высокая	средняя	высокая
Арагат	низкая	средняя	средняя	низкая	средняя
Армавир	низкая	средняя	средняя	низкая	средняя
Гехаркуник	средняя	высокая	средняя	средняя	высокая
Котайк	средняя	высокая	высокая	средняя	высокая
Лори	высокая	средняя	средняя	высокая	средняя
Ширак	высокая	средняя	средняя	средняя	высокая
Сюник	средняя	средняя	высокая	средняя	высокая
Тавуш	высокая	средняя	средняя	высокая	средняя
Вайодзор	низкая	средняя	высокая	низкая	средняя
Ереван	низкая	средняя	высокая	низкая	средняя

На основе данных о потенциальной угрозе для посевов, а также материалов из “Атласа сельского хозяйства Армянской ССР” (карты “Агроклиматическое районирование”, “Агропроизводственная группировка почв”, “Ландшафтные пояса и физико-географические районы”) [34], метеоинформации и данных дистанционного зондирования, была составлена карта “Районирование природно-территориальных комплексов Армении по степени риска развития патогенов пшеницы озимой” (рис. 4).

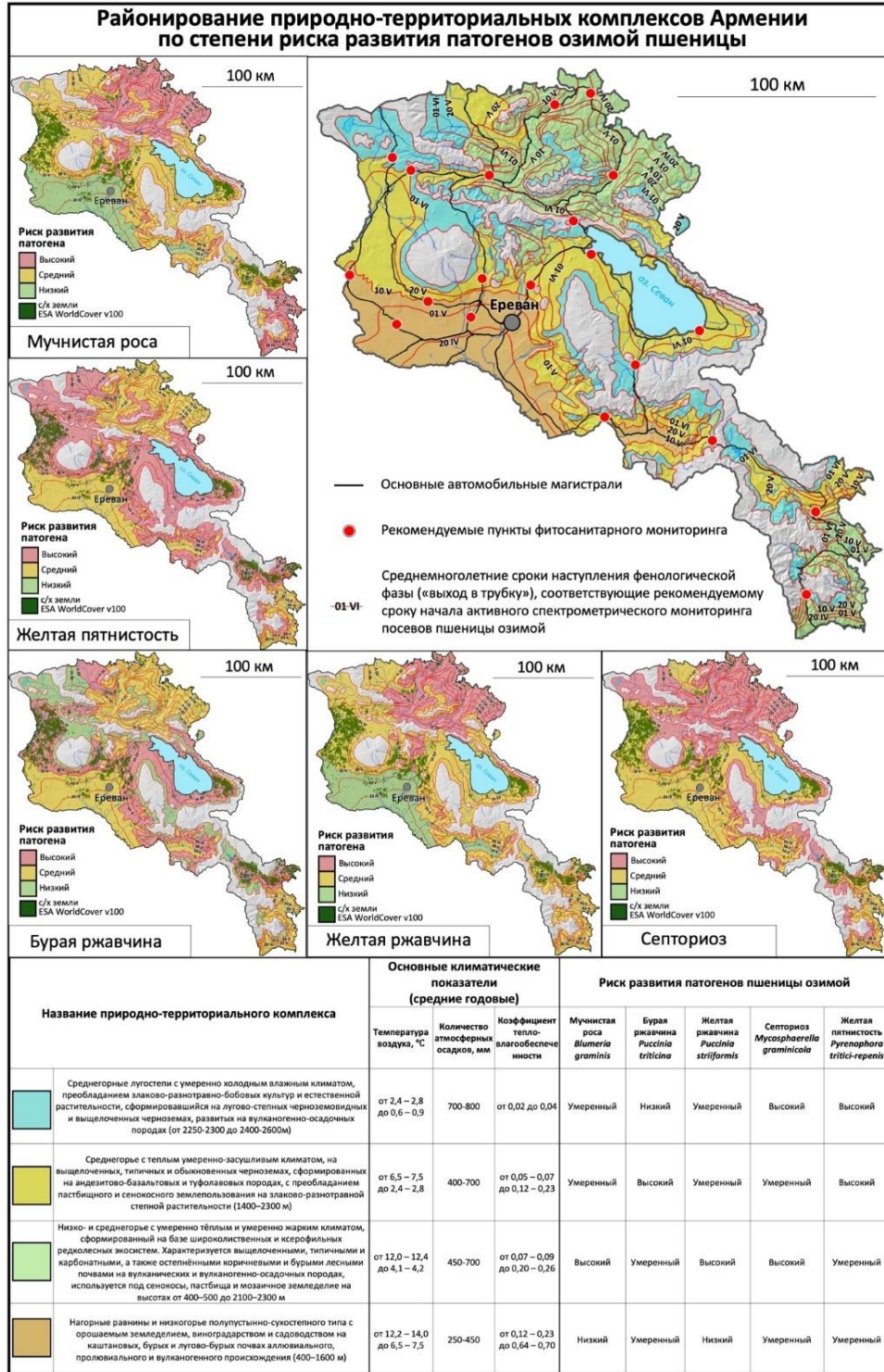


Рис. 4. Карта основных природно-территориальных комплексов Армении с общими рисками появления патогенов пшеницы озимой.

Карта включает ПТК, в пределах которых развитие ключевых листо-стеблевых грибковых патогенов пшеницы озимой имеет схожие особенности и риски, обусловленные климатическими, почвенными и орографическими особенностями, а также серию тематических карт, отражающих степень риска развития этих патогенов в указанных территориях.

В результате обработки метеорологических данных также были получены их тренды, указывающие на изменение климата в ландшафтных поясах. Среднегодовая температура воздуха и фотосинтетически активная радиация для территорий выращивания зерновых культур за период с 2000 по 2025 гг. выросли на 2°C и 0,35 МДж/м² соответственно. При этом дневная сумма осадков и относительная влажность воздуха снизились на 100 мм и 2,2% соответственно. Это указывает на аридизацию климата и дополнительно подтверждает наблюдаемый климатический тренд (рис. 5).

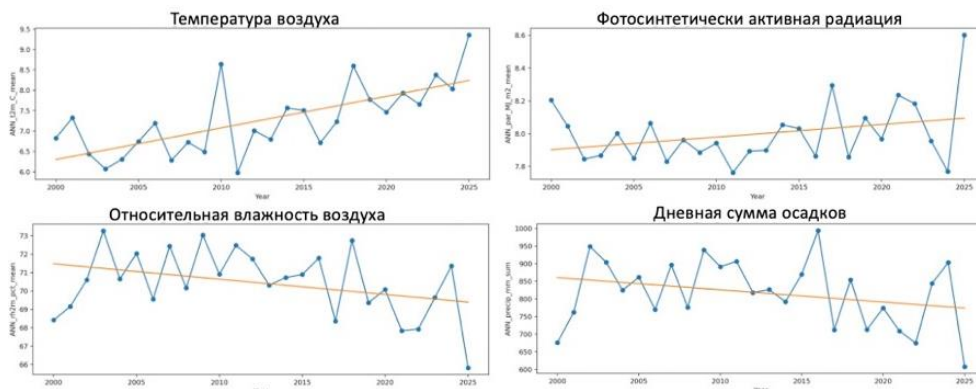


Рис. 5. Среднеголетний тренд метеорологических показателей для территорий произрастания зерновых культур в Армении.

Таблица 4

Динамика рисков возникновения патогенов пшеницы озимой при сохранении текущего тренда климатических изменений по ландшафтным поясам Армении

Ландшафтный пояс	Септориоз листьев	Желтая ржавчина	Бурая ржавчина	Мучнистая роса
Горно-долинный полупустынь	↓	↓	↑	↓
Низкогорный послелесной	↑	↑	↔	↑
Низкогорный сухих степей	↓	↓	↑	↓
Лесной низко- и среднегорья	↔	↔	↑	↔
Среднегорный степной	↔	↑	↔	↔
Среднегорный луговых степей	↑	↑	↔	↑
Высокогорный субальпийский	↔	↑	↔	↔
Высокогорный альпийский	↔	↑	↓	↔

Примечание: ↓ – снижение рисков; ↑ – повышение риска; ↔ – сохранение рисков.

В контексте текущих климатических трендов для Армении ожидается и перераспределение фитосанитарных рисков по ландшафтными поясам. Для листовых болезней и ржавчин ключевыми детерминантами остаются продолжительность увлажнения в пологе (листовая влажность, относительная влажность, роса) и температура в периоды восприимчивости культуры к заражению [51] (табл. 4).

В **горно-долинном** ландшафтном поясе **полупустынь** (наиболее теплые и сухие условия, дефицит длительной листовой влажности) для септориоза вероятно снижение среднего сезонного риска из-за недостатка увлажнения при сохранении кратковременных вспышек в годы с ливнями или длительной росой в загущенном пологе. Для мучнистой росы также вероятно снижение риска из-за сочетания высоких температур и низкой влажности, хотя локальные очаги могут сохраняться на более влажных и мягких участках (затенение, каналы и др.). Для бурой ржавчины вероятность повышения риска выше, поскольку в ряде регионов усиление ее вредоносности частично связывают с потеплением. Для желтой ржавчины ожидается ограничение эпидемического процесса, но риски полностью не исключаются из-за адаптационного потенциала патогена.

В **низкогорном послелесном** ландшафтном поясе (длительная повышенная влажность, частые росы и туманы, мозаичность экспозиций) возрастает вероятность формирования микроклимата, благоприятного для болезней, чувствительных к увлажнению. Для септориоза риск оценивается как повышенный за счет повторяемости “влажных окон” и регуляризации циклов заражения. Для мучнистой росы также ожидается рост риска, поскольку патоген эффективнее развивается при мягких температурах и высокой влажности полога без обязательной связи с сильными осадками. Для желтой ржавчины вероятно сохранение повышенного риска, включая более раннее проявление в годы с мягкой зимой; при этом потепление может смещать зону оптимума вверх по высоте. Для бурой ржавчины ожидается умеренный рост или сохранение повышенного риска, особенно на теплых экспозициях и при достаточной весенней влажности.

В ландшафтном поясе **низкогорных сухих степей** аридизация сокращает длительные периоды листовой влажности, что в среднем снижает вероятность септориоза, но усиливает межгодовую контрастность (возрастает роль отдельных дождей и росы). Для мучнистой росы вероятно снижение риска на фоне более жаркого и сухого режима. Для бурой ржавчины возможен умеренный рост или сохранение риска за счет удлинения теплого сезона при наличии периодов, достаточных для повторных циклов заражения. Для желтой ржавчины ожидается снижение или сохранение низкого риска из-за высоких температур и дефицита влаги, при сохранении очагов на прохладных экспозициях и в отдельные годы.

Лесной ландшафтный пояс **низко- и среднегорья** является переходным по сочетанию тепла и влаги; выраженный внутриландшафтный градиент (экспозиция, высота, мозаичность увлажнения) делает изменения риска менее однозначными и более зависимыми от погодного сценария года. Для мучнистой росы наиболее вероятен умеренный риск с повышением в годы

с мягкой и относительно влажной весной. Для желтой ржавчины риск, вероятно, сохранится на умеренном уровне с тенденцией смещения устойчивых очагов в более прохладные микрзоны. Для бурой ржавчины вероятен умеренный рост, особенно на теплых экспозициях.

В *среднегорном степном* ландшафтном поясе отдельные годы ожидается сохранение условий, потенциально благоприятных для ржавчин и части листовых пятнистостей. Для септориоза и мучнистой росы риск будет определяться прежде всего межгодовой вариабельностью увлажнения и микроклиматом полого. Для желтой ржавчины среднегорье остается зоной, где прохладные периоды поддерживают эпидемический процесс; при потеплении вероятно смещение оптимума вверх по высоте, но риск не исчезает, а меняет сезонную динамику. Для бурой ржавчины вероятен умеренный рост при удлинении теплого сезона.

Ландшафтный пояс *среднегорных луговых степей* в среднем более увлажнен, чем среднегорный степной. Поэтому риск септориоза здесь оценивается как повышенный вследствие большей повторяемости условий увлажнения листа. В тех же условиях возрастает вероятность мучнистой росы и сохраняется актуальность желтой ржавчины. Для бурой ржавчины риск чаще умеренный и повышается в теплые годы.

В *высокогорном субальпийском* ландшафтном поясе потепление уменьшает температурные ограничения и потенциально удлиняет вегетационный период, что может повышать вероятность успешного развития ряда патогенов. Для септориоза и мучнистой росы вероятно сохранение умеренного риска при достаточном увлажнении. Наиболее вероятно сохранение или повышение риска желтой ржавчины; потепление может увеличивать число сезонов, в которые патоген реализует больше циклов развития. Рост риска бурой ржавчины ограничен температурными условиями.

В *высокогорном альпийском* ландшафтном поясе температурный фактор остается сильным ограничителем септориоза, мучнистой росы и бурой ржавчины; их развитие возможно преимущественно в очаговой форме в очень теплые сезоны. Для желтой ржавчины возможна более стабильная поддержка очагов.

Пиренофороз (желтая пятнистость) в большей степени зависит от высокого уровня пожнивных остатков и повторных посевов восприимчивых сортов. Поэтому его риски в меньшей степени определяются климатическими изменениями, а расширение ареала скорее связано с увеличением площадей зерновых культур.

Рост температуры и солнечной радиации при сокращении осадков в большинстве случаев ведет к сокращению периода активного развития рассматриваемых патогенов в более засушливых природных зонах. Соответственно, предполагаемые сроки их дистанционного мониторинга будут смещаться на более ранние даты.

Это согласуется с изменениями фенологических показателей, рассчитанных по NDVI для территории выращивания зерновых культур Армении (рис. 6): в 2000–2025 гг. число дней роста надземной фитомассы уменьшилось на 2 дня, дата максимума вегетации наступает на 8 дней раньше, дата начала

сезона – на 1 день раньше, а максимальное сезонное значение NDVI увеличилось на 0,016. Такой рост NDVI соответствует глобальному тренду и связывается с совершенствованием технологий земледелия и появлением новых сортов [52].

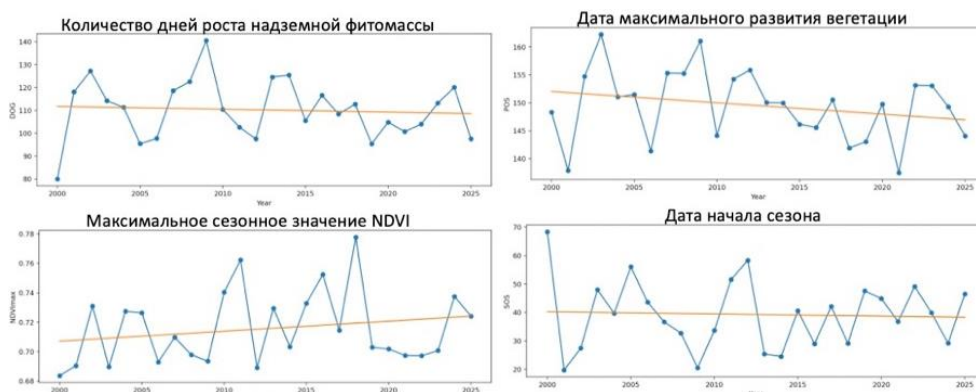


Рис. 6. Среднегодовое развитие фенологического развития зерновых культур Армении.

Можно предположить, что при сохранении текущих климатических изменений доля посевов в среднегорных луговых степях будет увеличиваться из-за повышения благоприятности условий выращивания (более высокая температура, более длинный вегетационный сезон, уменьшенное, но еще достаточное увлажнение). Однако именно в этих зонах возрастает риск листостебельных грибковых патогенов озимой пшеницы.

При выраженной высотной поясности уязвимость сельского хозяйства к природным опасностям остается высокой и существенно различается по природным зонам и культурам. Наиболее чувствительны низменные и среднегорные зоны, где сосредоточено основное земледелие и дефицит влаги уже лимитирует производство. В высокогорьях влияние климатических изменений слабее, но возрастают другие риски, связанные с трансформацией экосистем и режимов снеготаяния [53].

Климатические изменения неизбежно затронут и биоразнообразие: ожидаются сдвиги фенологических и биоэкологических характеристик видов, их ареалов и межвидовых взаимодействий. Изменение сроков вегетации, цветения и размножения, а также структуры местообитаний может вызвать перераспределение видов и трансформацию экосистемных связей. Следовательно, климатические изменения в Армении будут иметь комплексный характер, затрагивая природные ландшафты и аграрные системы и требуя адаптационных стратегий с учетом природной и хозяйственной неоднородности территории.

Практическая ценность результатов заключается в возможности перейти от разрозненных локальных наблюдений к зонально организованной схеме мониторинга, учитывающей высотную поясность, различия фенологии и повторяемость благоприятных для инфекции погодных “окон”. Карты риска и выделенные природные зоны могут служить основой для планирования

маршрутов и календаря обследований, выбора приоритетных участков для закладки наблюдательных площадок и оптимизации распределения ограниченных ресурсов фитосанитарных служб. В перспективе полученные материалы могут быть интегрированы в систему раннего предупреждения, где совмещаются сезонные индикаторы (фенологические сроки), оперативные метеоусловия и результаты дистанционного мониторинга для своевременного выявления очагов и профилактических мер, включая точечный контроль и снижение избыточного применения фунгицидов.

Заключение. В работе выполнена оценка пространственно-временного распределения фитопатогенных рисков для озимой пшеницы в Армении в логике ландшафтной поясности и на фоне современных климатических изменений. Показано, что сохранение текущего тренда аридизации (рост температуры и радиации при снижении осадков и относительной влажности) сопровождается сдвигами фенологических сроков и сокращением длительности фаз, в которые наиболее активно развиваются листостеблевые грибковые патогены. Это означает необходимость повышения оперативности мониторинга и смещения сроков дистанционного и маршрутного контроля на более ранние периоды вегетации.

На основе совокупности данных дистанционного зондирования, метеоинформации и ландшафтно-почвенных материалов составлена карта природно-территориальных комплексов с различной степенью фитопатогенного риска, предложены практические ориентиры по организации фитопатологического мониторинга в пределах этих территорий. Полученные оценки указывают, что при сохранении текущих климатических изменений риск развития ряда листостеблевых грибковых патогенов в среднем может снижаться в более теплых и засушливых низкогорных ландшафтных поясах и возрастать в среднегорных поясах, где сохраняется более благоприятное сочетание температур и условий увлажнения в критические фенологические периоды. В целом результаты подтверждают, что ландшафтная неоднородность Армении является ключевым фактором дифференциации фитосанитарных угроз и должна учитываться при планировании профилактических мер и систематического наблюдения за состоянием посевов.

Поступила 25.02.2026

Получена с рецензии 13.03.2026

Утверждена 20.04.2026

ЛИТЕРАТУРА

1. Advances in Cereal Science: Implications to Food Processing and Health Promotion (Eds. J.M. Awika, V. Piironen, S. Bean). *American Chemical Society* **1089** (2011).
2. Statistical Committee of the Republic of Armenia. Available online accessed on 19.02.2025. <https://armstat.am/en/>
3. Евразийский центр по продовольственной безопасности. Available online accessed on 19.02.2025. <https://ecfs.msu.ru/>

4. Колесняк А.А., Полянская Н.М. Оценка продовольственной самообеспеченности в странах мира. *Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ* 2 (2022). <https://doi.org/10.36718/2500-1825-2022-2-132-144>
5. Широков С.Н., Трушкина И.Р. Подходы к оценке объемов производства и потребности в зерне и обеспечение продовольственной безопасности государства. *МСХ* 4 (2021). <https://doi.org/10.24412/2587-6740-2021-4-50-54>
6. Figueroa M., Hammond-Kosack K.E., Solomon P.S. A Review of Wheat Diseases – a Field Perspective. *Mol. Plant Pathol.* 19 (2018), 1523–1536. <https://doi.org/10.1111/mpp.12618>
7. Zubrod J.P., Bundschuh M., et al. Fungicides: An Overlooked Pesticide Class? *Environ. Sci. Technol.* 53 (2019), 3347–3365. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04392>
8. Gikas G.D., Parlakidis P., et al. Particularities of Fungicides and Factors Affecting Their Fate and Removal Efficacy: A Review. *Sustainability* 14 (2022), 4056. <https://doi.org/10.3390/su14074056>
9. *Физическая география Армянской ССР*. Академия наук Армянской ССР, Ереван, Издательство Академии наук Армянской ССР (1971), 470.
10. Нанагюлян С.Г., Маргарян Г.Г. Материалы по ржавчинным грибам, обнаруженным в Нагорно-Карабахской Республике (НКР). *Ученые записки ЕГУ. Химия и биология* 3 (2008), 131–139. <https://doi.org/10.46991/PYSUB.2008.42.3.131>
11. Ахмедов С.А. Долгосрочный прогноз появления бурой ржавчины пшеницы в Степанакертском районе. Прогноз появления вредителей и болезней сельскохозяйственных культур. Тезисы докл. Ереван (1974), 13–15.
12. Бабаян А.А., Саркисян Дж.Д. Встречаемость стеблевой ржавчины на различных сортах пшеницы в Армении. *Тезисы сессии Закавказского совета по координации научно-исслед. работ по защите растений*. Ереван (1971), 181–183.
13. Осипян Л.Л. Дополнение к IV тому “Микофлора Армянской ССР. Ржавчинные грибы”. *Флора, растительность и растительные ресурсы Армении* 17 (2009), 102–103.
14. *Сельское хозяйство Армянской ССР* (под ред. Г.Г. Мелкумяна). Ереван, Айпетрат (1961), 483.
15. Velásquez A.C., Castroverde C.D.M., He S.Y. Plant-Pathogen Warfare under Changing Climate Conditions. *Current Biology* 28 (2018), R619–R634. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.03.054>
16. Мкртчян Р.С. Арутюнян А.В. Агроклиматическое обоснование сельскохозяйственного районирования территории Армении. *Ученые записки ЕГУ. Геология и география* 41 (2007), 128–136. <https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2007.41.2.128>
17. Melkonyan A. Climate Change Impact on Water Resources and Crop Production in Armenia. *Agric. Water Manag.* 161 (2015), 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.004>
18. United Nations Framework Convention on Climate Change. Available online: accessed on 11.02.2026. <https://unfccc.int/documents/227815>
19. Chaloner T.M., Fones H.N., et al. A New Mechanistic Model of Weather-dependent *Septoria tritici* Blotch Disease Risk. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biol. Sci.* 374 (2019), 20180266. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0266>
20. McDonald B.A., Mundt C.C. How Knowledge of Pathogen Population Biology Informs Management of *Septoria tritici* Blotch. *Phytopathology* 106 (2016), 948–955. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-16-0131-RVW>
21. Phuke R.M., He X., et al. Association Mapping of Seedling Resistance to Tan Spot (*Pyrenophora tritici-repentis* Race 1) in CIMMYT and South Asian Wheat Germplasm. *Front Plant Sci.* 11 (2020). <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01309>
22. Prahll K.C., Klink H., et al. Can Decision Support Systems Help Improve the Sustainable Use of Fungicides in Wheat? *Sustainability* 14 (2022), 15599. <https://doi.org/10.3390/su142315599>

23. Andersson B., Djurle A., et al. Comparison of Models for Leaf Blotch Disease Management in Wheat Based on Historical Yield and Weather Data in the Nordic-Baltic Region. *Agron. Sustain. Dev.* **42** (2022), 42.
<https://doi.org/10.1007/s13593-022-00767-7>
24. Huang L., Chen X., et al. Dynamic Analysis of Regional Wheat Stripe Rust Environmental Suitability in China. *Remote Sens (Basel)* **15** (2023), 2021.
<https://doi.org/10.3390/rs15082021>
25. Mahmoodi S., Ganje M.B., et al. Modeling Spatiotemporal Distribution of Yellow Rust Wheat Pathogen Using Machine Learning Algorithms. Insights from Environmental Assessment. *Environ. Technol. Innov.* **36** (2024), 103865.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103865>
26. Savary S., Willocquet L., et al. The Global Burden of Pathogens and Pests on Major Food Crops. *Nat. Ecol. Evol.* **3** (2019), 430–439.
<https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
27. Dolatabadian A., Neik T.X., et al. Image-based Crop Disease Detection Using Machine Learning. *Plant Pathol.* **74** (2025), 18–38.
<https://doi.org/10.1111/ppa.14006>
28. Anderegg J., Hund A., et al. In-Field Detection and Quantification of Septoria Tritici Blotch in Diverse Wheat Germplasm Using Spectral–Temporal Features. *Front Plant. Sci.* **10** (2019), 1355.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01355>
29. Terentev A., Dolzhenko V., et al. Current State of Hyperspectral Remote Sensing for Early Plant Disease Detection: A Review. *Sensors* **22** (2022), 757.
<https://doi.org/10.3390/s22030757>
30. Sereda I., Danilov R., et al. Development of Methods for Remote Monitoring of Leaf Diseases in Wheat Agrocenoses. *Plants* **12** (2023), 3223.
<https://doi.org/10.3390/plants12183223>
31. Kremneva O.Yu., Danilov R.Yu., et al. Spectral Characteristics of Winter Wheat Varieties Depending on the Development Degree of *Pyrenophora tritici-repentis*. *Precis. Agric.* **24** (2023), 830–852.
<https://doi.org/10.1007/s11119-022-09976-2>
32. Plantegenest M., Le May C., Fabre F. Landscape Epidemiology of Plant Diseases. *J. R. Soc. Interface* **4** (2007), 963–972.
<https://doi.org/10.1098/rsif.2007.1114>
33. Zanaga D., Van De Kerchove R. et al. ESA WorldCover 10 m 2020 v 100 (2021). Available online: accessed on 17.04.2025.
<https://zenodo.org/records/5571936>
34. *Атлас сельского хозяйства Арм. ССР*. ГУГК при Совете Министров СССР. Москва–Ереван (1984).
35. Gorelick N., Hancher M., et al. Google Earth Engine: Planetary-scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sens. Environ.* **202** (2017), 18–27.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
36. Ward J.H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *J. Am. Stat. Assoc.* **58** (1963), 236–244.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
37. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.* **36** (1964), 1627–1639.
<https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
38. Sustainable Caucasus. Available online: accessed on 11.02.2026.
<https://sustainable-caucasus.unepgrid.ch/catalogue/#/?sort=title>
39. Myneni R.B., Williams D.L. On the Relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sens. Environ.* **49** (1994), 200–211.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90016-7)
40. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D - 30 m (AW3D30)”. Available online: accessed on 19.02.2025.
<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30>
41. Мкртчян Р.С. *Агроклиматические ресурсы Армянской ССР*. Вологда, Вологодская Правда (1976).

42. Hersbach H., Bell B., et al. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **146** (2020), 1999–2049.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
43. Lawrence M.G. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **86** (2005), 225–234.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
44. Ruimy A., Saugier B., Dedieu G. Methodology for the Estimation of Terrestrial Net Primary Production from Remotely Sensed Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **99** (1994), 5263–5283.
<https://doi.org/10.1029/93JD03221>
45. Vallavieille-Pope C de. Comparative Effects of Temperature and Interrupted Wet Periods on Germination, Penetration, and Infection of *Puccinia recondita f. sp. tritici* and *P. striiformis* on Wheat Seedlings. *Phytopathology* **85** (1995), 409.
<https://doi.org/10.1094/Phyto-85-409>
46. Chen W., Wellings C., et al. Wheat Stripe (yellow) Rust Caused by *Puccinia striiformis f. sp. tritici*. *Mol. Plant Pathol.* **15** (2014), 433–446.
<https://doi.org/10.1111/mpp.12116>
47. Chungu C., Gilbert J., Townley-Smith F. *Septoria tritici* Blotch Development as Affected by Temperature, Duration of Leaf Wetness, Inoculum Concentration, and Host. *Plant Dis.* **85** (2001), 430–435.
<https://doi.org/10.1094/PDIS.2001.85.4.430>
48. Hosford Jr.R.M. Interaction of Wet Period and Temperature on *Pyrenophora tritici-repentis* Infection and Development in Wheats of Differing Resistance. *Phytopathology* **77** (1987), 1021.
<https://doi.org/10.1094/Phyto-77-1021>
49. Schnathorst W.C. Environmental Relationships in the Powdery Mildews. *Annu. Rev. Phytopathol.* **3** (1965), 343–366.
<https://doi.org/10.1146/annurev.py.03.090165.002015>
50. Sereda I. Monitoring the Onset of Phenological Phases “Stem Elongation” and “Heading” of Winter Wheat in the Republic of Armenia Using Remote Sensing Methods. *AgriScience and Technology* **3** (2024), 317–325.
<https://doi.org/10.52276/25792822-2024.4-317>
51. Pokhrel B. Effects of Environmental Factors on Crop Diseases Development. *J. Plant Pathol. Microbiol.* **12** (2021), 553.
52. Gao X., Liang S., He B. Detected Global Agricultural Greening from Satellite Data. *Agric. For Meteorol.* **276–277** (2019), 107652.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107652>
53. Pauli H., Halloy S.R.P. *High Mountain Ecosystems Under Climate Change*. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science, Oxford University Press (2019).
<https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.764>

Ի. Ի. ՍԵՐԵԴԱ

ԱՇՆԱՆԱՑԱՆ ՑՈՐԵՆԻ ՀԱՐՈՒՑԻՉՆԵՐԻ ՉԱՐԳԱՑՄԱՆ ՌԻՍԿԵՐԻ
ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ՀՀ ԼԱՆԴՇԱՖՏԱՅԻՆ ԳՈՏԻՆԵՐՈՒՄ
ՀԱՇՎԻ ԱՌՆԵԼՈՎ ԿԼԻՄԱՅԻ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հայաստանի բարձրադիր գոտիականության և կլիմայի դիտարկվող արիդացման պայմաններում հացահատիկային մշակաբույսերի ֆենոլոգիական առանձնահատկություններն ու ֆիտոպաթոլոգիական ռիսկերը ենթական են փոփոխվելու: Հետազոտության նպատակն է գնահատել լանդշաֆտային

գոտիականության և ժամանակակից կլիմայական միտումների ազդեցությունը աշնանացան ցորենի հիմնական սնկային հարուցիչների (դեղին ժանգ, գորշ ժանգ, սեպտորիոզ, ալրացող, դեղին բծավորություն) զարգացման ռիսկի տարածաժամանակային բաշխման վրա:

Բացահայտվել են հացահատիկային մշակաբույսերի կանոնավոր մշակության հիմնական գոտիները, բնութագրվել են դրանց ֆենոլոգիական առանձնահատկությունները տարբեր ֆիզիկաաշխարհագրական պայմաններում և կազմվել են այդ հարուցիչների ի հայտ գալու ռիսկերի վերաբերյալ քարտեզագրական նյութեր:

Հետազոտությունը ցույց է տվել, որ բարձրությունը որոշում է ֆենոլոգիական անհամաժամանակությունը: Տաքացումն ու խոնավության նվազումը ուղեկցվում են սեզոնային զարգացման արագացմամբ և ռիսկերի վերաբաշխմամբ: Ցածր լեռնային գոտիներում ռիսկը միջինում նվազում է, իսկ միջին լեռնային գոտիներում՝ աճում: Եզրահանգել ենք, որ անհրաժեշտ է բուսասանիտարական մոնիթորինգի ավելի վաղ իրականացումը, ինչպես նաև դրա առաջնահերթությունների սահմանումը՝ ըստ գոտիականության:

I. I. SEREDA

RISK ASSESSMENT OF WINTER WHEAT PATHOGEN DEVELOPMENT IN THE LANDSCAPE BELTS OF ARMENIA UNDER CLIMATE CHANGE

Summary

Armenia's pronounced altitudinal zonation and ongoing climate aridization may change both crop phenology and phytopathological risks in cereal-growing areas.

This study evaluates how landscape belts and recent climate trends affect the spatiotemporal distribution of risk for the main fungal diseases of winter wheat, including yellow rust, leaf rust, septoria tritici blotch, powdery mildew, and tan spot. To address this goal, stable cereal cultivation zones were identified, their phenological features were analyzed under different physical-geographical conditions, and risk maps were created for the selected pathogens.

The results demonstrate that elevation is a key driver of phenological asynchrony. Warming and lower moisture availability are associated with faster seasonal development and a redistribution of disease risks: on average, risk decreases in low-mountain areas and increases in mid-mountain belts. These findings highlight the need for earlier, zone-prioritized phytosanitary monitoring.