

Обзорная статья

УДК 631.4:551.583

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-40-46>

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА УПЛОТНЕНИЕ ПОЧВЫ

И.Н. Гаспарян¹, О.Н. Ивашова^{2✉}, Ш.В. Гаспарян³, Н.Ф. Денискина⁴¹ Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова; г. Москва, Российская Федерация² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Технологический институт; г. Москва, Российская Федерация⁴ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Агробиотехнологий институт; г. Москва, Российская Федерация¹ irina150170@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-4702-0095² o.ivashova@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0001-9206-9862³ gas_shag@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0001-7161-3654⁴ ndeniskina@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-3111-6869

Аннотация. В статье рассматривается влияние современных климатических изменений на процессы уплотнения почвы как одного из ключевых факторов снижения продуктивности агроэкосистем. Показано, что изменение климата в России проявляется не только в росте температуры (до 0,47°C за десятилетие), но и в трансформации гидротермического режима включая повышение частоты экстремальных осадков, изменение сезонности и рост климатической нестабильности. Установлено, что основным механизмом усиления уплотнения почвы является изменение водного режима почв: при увеличении доли ливневых осадков ухудшается инфильтрация влаги, усиливаются поверхностный сток и эрозия, формируется почвенная корка. Особое внимание уделено изменению физических свойств почвы. Уплотнение почвы сопровождается повышением плотности сложения (с 1,1-1,2 до 1,4-1,6 г/см³), снижением общей пористости (с 50-55 до 35-40%), ухудшением структуры и разрушением агрегатов. Это приводит к снижению водопроницаемости, ухудшению аэрации и нарушению газообмена, что ограничивает поступление кислорода к корням растений и почвенной биоте. Изменение соотношения твердой, жидкой и газовой фаз почвы ухудшает условия развития корневой системы и снижает эффективность использования влаги и элементов питания. Отмечается, что сочетание повышенной влажности почвы и роста массы сельскохозяйственной техники приводит к формированию устойчивых уплотненных горизонтов включая плужную подошву, что вызывает потери урожайности до 10-40%. Дополнительно рассматривается роль почвенной биоты, чувствительной к изменениям физического состояния почвы. В работе показано, что уплотнение почвы в условиях климатических изменений носит накопительный характер, формируя замкнутый цикл деградации, и требует комплексных мер адаптации сельского хозяйства.

Ключевые слова: изменение климатических условий, физические свойства, уплотнение почвы, плотность сложения, газообмен

Для цитирования: Гаспарян И.Н., Ивашова О.Н., Гаспарян О.Н., Денискина Н.Ф. Влияние изменения климата на уплотнение почвы. Природообустройство. 2026;Т.19(3):40-46. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-40-46>

Scientific article

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON SOIL COMPACTION

I.N. Gasparyan¹, O.N. Ivashova^{2✉}, Sh.V. Gasparyan³, N.F. Deniskina⁴¹ FGBNU "All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov", Moscow, Russian Federation² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after Moscow, Russian Federation³ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; Institute of Technology, Moscow, Russian Federation⁴ RGAU-MSHA named after K.A. Timiryazev N. Kostyakov, Institute of Agrobiotechnologies; Moscow, Russian Federation¹ irina150170@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-4702-0095² o.ivashova@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0001-9206-9862³ gas_shag@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0001-7161-3654⁴ ndeniskina@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-3111-6869

Abstract. The article considers the impact of modern climate change on soil compaction processes as one of the key factors reducing the productivity of agroecosystems. It is shown that climate change in Russia

is manifested not only in the increase in temperature (up to 0.47°C per decade), but also in the transformation of the hydrothermal regime, including an increase in the frequency of extreme precipitation events, a change in seasonality, and an increase in climatic instability. It has been established that the main mechanism for increasing compaction is a change in the water regime of soils: with an increase in the proportion of heavy precipitation, moisture infiltration deteriorates, surface runoff and erosion increase, and a soil crust forms. Particular attention is paid to changes in the physical properties of the soil. Compaction is accompanied by an increase in bulk density (from 1.1-1.2 to 1.4-1.6 g/cm³), a decrease in total porosity (from 50-55% to 35-40%), deterioration of the structure, and the destruction of aggregates. This leads to decreased water permeability, impaired aeration, and disrupted gas exchange, limiting oxygen supply to plant roots and soil biota. Changes in the ratio of solid, liquid, and gas phases in the soil worsen the conditions for root development and reduce the efficiency of moisture and nutrient use. It is noted that the combination of increased soil moisture and increased agricultural machinery mass leads to the formation of stable compacted horizons, including plow pans, causing yield losses of up to 10-40%. The role of soil biota, which is sensitive to changes in the physical condition of the soil, is also considered. The study demonstrates that compaction under climate change is cumulative, creating a vicious cycle of degradation and requiring comprehensive agricultural adaptation measures.

Keywords: climate change, physical properties, compaction, bulk density, gas exchange

For citation: Gasparyan I.N., Ivashova O.N., Gasparyan O.N., Deniskina N.F. The impact of climate change on soil compaction. *Prirodoobustrojsvo*. 2026;19(3):40-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-40-46>

Введение. В последние десятилетия на территории России наблюдается устойчивое изменение климатических условий, проявляющееся не только в росте температуры, но и в качественной трансформации гидротермического режима. Согласно данным Росгидромета скорость потепления в России составляет около 0,47°C за десятилетие, что существенно превышает среднемировые значения [1-3]. Однако более важным является не сам факт повышения температуры, а изменение структуры климатических факторов, определяющих продукционный процесс в агроэкосистемах.

Агроклиматические изменения приводят к трансформации земледелия. Так, удлинение вегетационного периода на 10-20 суток [1-3], зафиксированное в средней полосе России, создает предпосылки для увеличения продуктивности. Однако, как показывают исследования Hatfield & Prueger (2015), увеличение длительности вегетации является эффективным только при достаточном уровне влагообеспеченности и отсутствии температурного стресса [4]. Практические наблюдения в России подтверждают эту закономерность. Так, в ряде хозяйств Центрального федерального округа внедрение позднеспелых сортов зерновых и масличных культур позволило повысить урожайность на 8-12%, однако в засушливые годы этот эффект нивелируется [5].

Результаты исследований, опубликованные в международных журналах (например, Lobell et al., 2021; Asseng et al., 2019), показывают, что повышение температуры на 1°C при прочих равных условиях может приводить к снижению

урожайности зерновых культур на 5-7% вследствие ускорения фенологических фаз и сокращения периода наливания зерна [1-2]. Это подтверждает, что эффект потепления имеет нелинейный характер и зависит от взаимодействия температуры с водным режимом и состоянием почвы.

Особенно значимые изменения фиксируются в зимний период. Потепление зим на 2-3°C сопровождается учащением оттепелей и сокращением устойчивого снежного покрова [6]. По данным IPCC (2021), это приводит к увеличению частоты циклов «Замерзание-оттаивание», что вызывает разрушение почвенной структуры и снижение агрегатной устойчивости [7-10]. В условиях сельскохозяйственного использования это напрямую связано с повышением риска уплотнения почвы в весенний период.

Цель исследований: рассмотреть влияние современных климатических изменений на процессы уплотнения почвы как одного из ключевых факторов снижения продуктивности агроэкосистем.

Материалы и методы исследований. Почва является основным производственным ресурсом в растениеводстве. Ее физические, химические и биологические свойства определяют водный и воздушный режимы, доступность элементов питания и условия развития корневой системы растений. Нарушение структуры почвы вследствие переуплотнения приводит к деградации агроландшафтов и снижению эффективности применения удобрений и средств защиты растений [6].

В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства проблема уплотнения почвы приобретает системный характер особенно при изменении климата. Изменение климата усиливает процессы уплотнения почвы не напрямую, а через изменение водного режима, увеличение частоты экстремальных осадков и нарушение агротехнологических сроков, в связи с чем требует комплексного научного подхода, включающего в себя инженерные, агрономические и цифровые решения.

Оптимальное состояние пахотного слоя характеризуется определенным соотношением твердых частиц, воды и воздуха. Корневая система растений является одним из наиболее чувствительных элементов агроценоза к изменению физических свойств почвы. Глубина проникновения в почву корней растений в естественном ареале довольно глубокая – до 2-2,5 м [11]. При подготовке почвы стандартная глубина вспашки составляет около 20-25 см [12]. Многолетнее использование одинаковой глубины обработки привело к формированию плужной подошвы – плотного подпахотного горизонта. Повышенная плотность почвенного слоя ограничивает проникновение корней в глубь профиля, снижает объем доступной влаги и элементов питания [11]. Как следствие, на уплотненных участках почвы наблюдаются снижение урожайности зерновых культур, ухудшение структуры урожая и уменьшение массы зерна. Для корнеклубнеплодов характерными являются формирование деформированных органов, снижение товарных качеств и ухудшение условий хранения [13].

Наиболее опасным является сочетание повышенной влажности почвы в периоды проведения полевых работ с ростом массы сельскохозяйственной техники, что приводит к формированию устойчивых уплотненных горизонтов (рис. 1) и снижению продуктивности агроэкосистем.

Уплотнение почвы приводит также к повышению энергетических затрат при выполнении полевых работ. Возрастает тяговое сопротивление рабочих органов машин, увеличивается расход топлива и снижается производительность агрегатов [14].

Основным механизмом влияния изменения климата на уплотнение почвы является изменение ее влажностного режима. Несмотря на увеличение годового количества осадков на 5-10%, их агрономическая эффективность снижается [6, 12]. Исследования Fischer et al. (2020) показывают, что увеличение доли интенсивных осадков (ливней) приводит к таким последствиям, как снижение инфильтрации влаги в почву,

усиление поверхностного стока, рост водной эрозии, формирование плотной почвенной корки [16]. В результате формируется парадоксальная ситуация: при формальном увеличении осадков фактическая влагообеспеченность растений ухудшается. Это связано с ростом испаряемости, который, по оценкам Allen et al. (FAO), увеличивается на 2-4% при повышении температуры на 1°C [16].

Ключевой принцип заключается в том, что при повышении влажности почва становится более уязвимой к механическому воздействию. Это обусловлено тем, что вода снижает прочность почвенных агрегатов, повышает пластичность почвы и облегчает разрушение порового пространства под действием сельскохозяйственной техники.

Интенсивные осадки также способствуют формированию поверхностной корки вследствие разрушения структуры и заплывания почвы. Это ухудшает аэрацию, снижает полевую всхожесть культур и усиливает эрозионные процессы [17].

В условиях современных климатических изменений наблюдается рост доли ливневых осадков, характеризующихся высокой интенсивностью и кратковременностью. В результате почва быстро переувлажняется, а полевые работы зачастую осуществляются при избыточной влажности. Это приводит к формированию как поверхностного, так и подпочвенного уплотнения.

Исследования (Daryanto et al., 2017) показывают: засухи, даже кратковременные, в критические фазы развития растений (кущение, цветение) могут снижать урожайность на 20-50% [18], что коррелирует с наблюдаемыми тенденциями для Поволжья и Центрального региона.

Дополнительную опасность представляет чередование периодов избыточного увлажнения

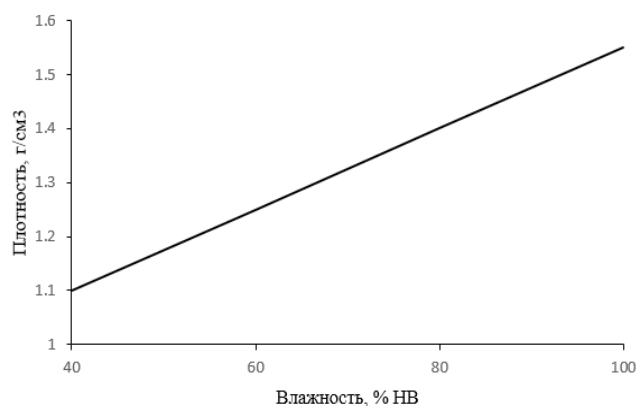


Рис. 1. Зависимость плотности почвы от влажности

Fig. 1. Dependence of soil density on moisture

и засухи. После насыщения влагой почва резко высыхает, ее структура разрушается, формируется плотная корка и происходит заплывание верхнего слоя, что усиливает процессы уплотнения почвы.

Засуха также влияет на уплотнение почвы и носит двойственный характер. С одной стороны, снижение влажности уменьшает непосредственную восприимчивость почвы к уплотнению, с другой – происходит деградация структуры почвы: уменьшается содержание органического вещества, снижается биологическая активность, ухудшаются агрегатная структура и устойчивость агрегатов. В результате последующего увлажнения такие почвы легко разрушаются и подвергаются вторичному уплотнению.

В условиях изменения климата, особенно при учащении засух, переувлажнения и резких колебаний температуры, ухудшаются условия существования дождевых червей, почвенной мезо- и микрофауны, а также микроорганизмов. По данным A. Beylich et al., уплотнение почвы негативно влияет не только на физические свойства, но и на почвенные организмы, дыхание почвы, нитрификацию и минерализацию органического вещества [19]. Дополнительно установлено, что уплотнение почвы ограничивает диффузию кислорода в почвенном профиле. Это приводит к подавлению аэробных микробиологических процессов включая нитрификацию и минерализацию органического вещества. В результате снижаются интенсивность почвенного дыхания и трансформация азота, что ухудшает обеспеченность растений доступными формами питательных элементов. Это важно, поскольку именно биота участвует в создании устойчивой поровой системы: дождевые черви формируют ходы и биопоры, улучшают водопроницаемость, а микроорганизмы участвуют в образовании органо-минеральных агрегатов. Например, в обзоре J. Whalen и соавторами показано, что дождевые черви обычно повышают структурную устойчивость почвы, увеличивают пористость и снижают поверхностный сток [20]. Экспериментальные данные Y. Carowicz et al. также подтверждают, что дождевые черви способны частично восстанавливать уплотненные зоны почв: вид *Lumbricus terrestris*, формирующий глубокие вертикальные ходы, проходил через плужную подошву и создавал каналы, которые могли использоваться корнями растений [19]. Следовательно, снижение численности дождевых червей уменьшает естественную способность почвы к разуплотнению.

Ослабление микробиологической активности также имеет принципиальное значение. Почвенные микроорганизмы обеспечивают минерализацию органического вещества, трансформацию азота, образование микробной биомассы и стабилизацию почвенных агрегатов. При нарушении порового пространства ухудшается аэрация, снижается доступность кислорода и изменяется водный режим, что ограничивает активность аэробных микроорганизмов. В результате уменьшается интенсивность биохимических процессов, связанных с питанием растений и восстановлением структуры почвы.

Снижение активности почвенной биоты является не вторичным, а одним из ключевых механизмов накопления эффектов уплотнения. При нормальном состоянии агроэкосистемы корни растений, дождевые черви и микроорганизмы частично компенсируют механическое воздействие техники за счет формирования биопор, агрегатов и органического вещества. Однако при климатической нестабильности эта способность ослабевает, поэтому последствия уплотнения почвы становятся более длительными и более трудно обратимыми.

Изменение климата проявляется в устойчивом потеплении, и прежде всего в зимний период, что сопровождается сокращением продолжительности устойчивого снежного покрова и учащением оттепелей [2]. Одновременно наблюдается смещение сезонных границ: весна наступает раньше, а осенний период становится более продолжительным и мягким [1-3]. Существенной особенностью является рост климатической нестабильности, при котором ранее редкие аномальные погодные условия становятся регулярным явлением [5]. Изменяется и водный режим территорий: сроки весеннего паводка смещаются на более ранние, а в летний период чаще формируется дефицит влаги [2]. Указанные процессы приводят к ухудшению почвенных условий, что выражается в пересыхании верхнего слоя почвы и усилении эрозионных процессов вследствие интенсивных ливневых осадков.

Климатические изменения также косвенно влияют на уплотнение почвы через изменение агротехнологий. Смещение сроков сезонных работ, связанное с ранним наступлением весны, приводит к тому, что техника выходит в поле до достижения оптимальной физической спелости почвы, и это вызывает глубокое ее уплотнение. Кроме того, сокращение устойчивых периодов с благоприятными условиями для обработки вынуждает проводить работы в ограниченные временные интервалы, зачастую

при неблагоприятной влажности, что увеличивает уровень техногенного уплотнения почвы.

Дополнительным фактором является увеличение массы сельскохозяйственной техники. В условиях климатической нестабильности возрастает необходимость оперативного проведения работ, что сопровождается использованием более тяжелых агрегатов. В советское время масса тракторов составляла около 6-8 т [12]. Современные колесные тракторы достигают массы 25-30 т, а зерноуборочные комбайны с полной загрузкой бункера – до 35 т [12]. Каждое прохождение такой техники создает значительное давление на почву.

Машины и трактора расплющивают и прессуют пахотный слой. Уплотняющее действие от колес и гусениц распространяется глубоко (до 1 м) и до 0,8 м в поперечном сечении, сохраняясь до следующего вегетационного сезона [15]. Разрушенная структура почвы полностью не восстанавливается, а на следующий год все повторяется. С течением времени почва деградирует. В сочетании с повышенной влажностью это приводит к росту давления на почву и формированию уплотненных горизонтов включая плужную подошву на глубине 20-40 см.

В совокупности перечисленные факторы формируют замкнутый цикл деградации почв: интенсивные осадки разрушают структуру, техника уплотняет почву, уплотнение ухудшает водопроницаемость, что в свою очередь усиливает негативное воздействие последующих осадков. Данный процесс носит накопительный характер и приводит к постепенному ухудшению агрофизических свойств почвы.

По данным агрономических исследований, уплотнение почвы сопровождается снижением общей пористости с 50-55 до 35-40% и увеличением плотности сложения с 1,1-1,2 до 1,4-1,6 г/см³ [21]. Это приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур: для зерновых культур потери составляют 10-30%, для пропашных – до 40% (рис. 2) [21].

Изменение климата усиливает процессы уплотнения почвы не напрямую, а через трансформацию водного режима, увеличение частоты экстремальных осадков и нарушение оптимальных сроков проведения агротехнических мероприятий. Наиболее опасным является сочетание повышенной влажности почвы в периоды проведения полевых работ с ростом массы сельскохозяйственной техники, что приводит к формированию устойчивых уплотненных горизонтов и снижению продуктивности агроэкосистем.

Для повышения продуктивности агроэкосистем необходимым является переход

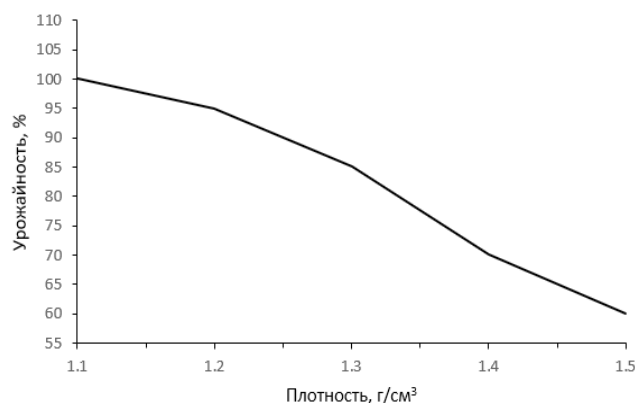


Рис. 2. Влияние уплотнения почвы на урожайность

Fig. 2. Effect of soil compaction on yield

к адаптивно-управляемым системам земледелия, а именно:

1. Необходим пересмотр системы обработки почвы. Использование постоянной глубины вспашки должно быть заменено дифференцированной системой обработки с периодическим глубоким рыхлением (чизелевание, глубокорыхление) для разрушения плужной подошвы. Возможно применение технологий минимальной и нулевой обработки, которое должно сопровождаться контролем плотности почвы, так как в условиях переувлажнения они не всегда предотвращают уплотнение подпахотных горизонтов.

2. Требуется внедрение технологий контролируемого движения техники. Ограничение зон проезда сельскохозяйственных машин позволит локализовать уплотнение почвы и сохранить большую часть поля в структурно стабильном состоянии. Необходимо снижать давление на почву за счет использования шин низкого давления, оптимизации массы сельскохозяйственных агрегатов, а также использования БПЛА на ряде технологических операций (примерно 15%).

3. Важным моментом является переход к управлению сроками полевых работ на основе фактического состояния почвы (физической спелости почвы), а не календарных дат. Использование датчиков влажности, цифровых моделей и систем мониторинга позволяет избегать проведения работ в условиях переувлажнения.

4. Введение покровных культур, увеличение доли органического вещества, применение сидеральных культур усилят биологизацию земледелия и будет способствовать восстановлению почвенной структуры. Для достижения устойчивой поровой системы и повышения естественной способности почвы к разуплотнению необходимо поддержание активности дождевых червей и микроорганизмов.

5. Совершенствование водного режима агроландшафтов: развитие систем поверхностного и внутрипочвенного дренажа, применение агроприемов, повышающих инфильтрацию (мульчирование, сохранение растительных остатков), а также мероприятия по снижению поверхностного стока и эрозии. В условиях учащения ливневых осадков это становится ключевым фактором сохранения продуктивной влаги.

6. Адаптация структуры посевных площадей и сортовой состав культур. Следует сочетать использование более позднеспелых высокопродуктивных сортов с засухо- и стрессоустойчивыми формами, включение культур с различной глубиной корневой системы, что позволит снизить риски в условиях климатической нестабильности.

Список использованных источников

1. Lobell D.B., Schlenker W., Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980 // *Science*. 2011. Vol. 333, № 6042. Pp. 616-620. DOI: 10.1126/science.1204531
2. Росгидромет. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации. М., 2022. 104 с.
3. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC). Изменение климата 2021: Физическая научная основа. Женева: IPCC, 2021. 2391 с.
4. Hatfield J.L., Prueger J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development // *Weather and Climate Extremes*. 2015. Vol. 10. Pp. 4-10. DOI: 10.1016/j.wace.2015.08.001
5. Порфирьев Б.Н., Катцов В.М., Рогинко С.А. и др. Экономические эффекты изменения климата в России // *Экономика региона*. 2017. Т. 13, № 2. С. 431-444 EDN: DRXHWS
6. Иванов А.Л., Кирюшин В.И. Адаптация сельского хозяйства к изменениям климата. М.: Росинформагротех, 2019. 384 с.
7. Oztas T., Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability // *Soil & Tillage Research*. 2003. Vol. 72, № 1. P. 1. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00015-9
8. Cheng Y., Wang J., Li X., Zhang H. et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil structure and physical properties // *Agriculture*. 2025. Vol. 15, № 22. P. 2369. DOI: 10.3390/agriculture15222369
9. Qin Y., Zhang H., Liu Z., Wang X. et al. Freeze-thaw effects on soil structure and pore system: A review // *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16, № 5. P. 2589. DOI: 10.3390/app16052589
10. Ge Z., Peng X., Horn R. Impact of freeze-thaw cycles on soil aggregation and pore structure // *Geoderma*. 2025. Vol. 448. P. 116865. DOI: 10.1016/j.geoderma.2025.116865
11. Colombi T., Torres L.C., Walter A., Keller T. Root growth in compacted soils: A review // *Plant and Soil*. 2018. Vol. 423. Pp. 1-17. DOI: 10.1007/s11104-017-3514-2
12. Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Голубев И.Г. Развитие мобильной энергетики с учетом агротехнологических ограничений // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 4. С. 26-32. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-26-32 EDN: BGHYWD
13. Li T., Zhang Y., Wang X. et al. From soil health to agricultural productivity: The critical role of soil constraints // *Agricultural Systems*. 2025. Vol. 210. P. 103789. DOI: 10.1016/j.agry.2025.103789
14. Zhang B., Jia Y., Fan H., Guo C., Fu J., Li S. et al. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic

7. Возрастает роль точного земледелия. Карты плотности почвы, урожайности и влажности позволяют дифференцированно применять агротехнические приемы, локализовать проблемные зоны и оптимизировать нагрузку на почву.

Таким образом, в условиях изменения климата устойчивость сельскохозяйственного производства определяется способностью управлять почвенными процессами и адаптировать технологии к возрастающей вариативности природных условий. Игнорирование проблемы уплотнения почвы приведет к накоплению деградационных эффектов и снижению продуктивности, тогда как внедрение комплексных адаптивных решений позволит не только стабилизировать урожайность, но и повысить эффективность использования природных ресурсов.

References

1. Lobell D.B., Schlenker W., Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980 // *Science*. 2011. Vol. 333. No. 6042. P. 616-620. DOI: 10.1126/science.1204531.
2. Roshydromet. Report on the peculiarities of the climate on the territory of the Russian Federation. Moscow: 2022. 104 p.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Geneva: IPCC, 2021. 2391 p.
4. Hatfield J.L., Prueger J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development // *Weather and Climate Extremes*. 2015. Vol. 10. P. 4-10. DOI: 10.1016/j.wace.2015.08.001.
5. Porfiriev B.N., Kattsov V.M., Roginko S.A., et al. Economic effects of climate change in Russia. 2017. Porfiriev B.N., Kattsov V.M., Roginko S.A., et al. Economic effects of climate change in Russia // *Economy of the region*. 2017. V. 13. № 2. P. 431-444. EDN: DRXHWS
6. Ivanov A.L., Kiryushin V.I. Adaptation of agriculture to climate change. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2019. 384 p.
7. Oztas T., Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability // *Soil & Tillage Research*. 2003. Vol. 72. No. 1. P. 1. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00015-9.
8. Cheng Y., Wang J., Li X., Zhang H. et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil structure and physical properties // *Agriculture*. 2025. Vol. 15. No. 22. P. 2369. DOI: 10.3390/agriculture15222369.
9. Qin Y., Zhang H., Liu Z., Wang X. et al. Freeze-thaw effects on soil structure and pore system: A review // *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16. No. 5. P. 2589. DOI: 10.3390/app16052589.
10. Ge Z., Peng X., Horn R. Impact of freeze-thaw cycles on soil aggregation and pore structure // *Geoderma*. 2025. Vol. 448. – P. 116865. DOI: 10.1016/j.geoderma.2025.116865.
11. Colombi T., Torres L.C., Walter A., Keller T. Root growth in compacted soils: A review // *Plant and Soil*. 2018. Vol. 423. P. 1-17. DOI: 10.1007/s11104-017-3514-2.
12. Levshin A.G., Gasparyan I.N., Golubev I.G. Development of mobile energy taking into account agrotechnological restrictions // *Agricultural engineering*. 2023. V. 25. № 4. P. 26-32. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-26-32. EDN: BGHYWD
13. Li T., Zhang Y., Wang X. et al. From soil health to agricultural productivity: The critical role of soil constraints // *Agricultural Systems*. 2025. Vol. 210. P. 103789. DOI: 10.1016/j.agry.2025.103789.
14. Zhang B., Jia Y., Fan H., Guo C., Fu J., Li S. et al. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic

review // *Land Degradation & Development*. 2024. Vol. 35, № 3. Pp. 945-962. DOI: 10.1002/ldr.4765

15. Fischer G., Tubiello F.N., van Velthuisen H., Wiberg D. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080 // *Global Environmental Change*. 2007. Vol. 17, № 3-4. Pp. 485-497. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002

16. Ahmad N.F.A., Nasir N.M., Yusop Z. Sensitivity analysis of FAO Penman-Monteith reference evapotranspiration to climatic variables // *Jurnal Teknologi*. 2017. Vol. 79, № 6. Pp. 63-69. DOI: 10.11113/jt.v79.8377

17. Horn R., Domžal H., Słowińska-Jurkiewicz A., van Ouwerkerk C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils // *Soil & Tillage Research*. 1995. Vol. 35, № 1-2. Pp. 23-36. DOI: 10.1016/0167-1987(95)00479-C

18. Daryanto S., Wang L., Jacinthe P.A. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review // *Agricultural Water Management*. 2017. Vol. 179. Pp. 18-33. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.04.022

19. Longepierre M., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction // *Soil Biology and Biochemistry*. 2021. Vol. 160. P. 108349. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108349

20. Whalen J.K., Hamel C. Effects of key soil organisms on nutrient dynamics in temperate agroecosystems // *Journal of Crop Improvement*. 2008. Vol. 22, № 1. Pp. 1-28. DOI: 10.1080/15427520801911397

21. Asseng S., Ewert F., Martre P. et al. Rising temperatures reduce global wheat production // *Nature Climate Change*. 2015. Vol. 5. Pp. 143-147. DOI: 10.1038/nclimate2470

review // *Land Degradation & Development*. 2024. Vol. 35, No. 3. P. 945-962. DOI: 10.1002/ldr.4765.

15. Fischer G., Tubiello F.N., van Velthuisen H., Wiberg D. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080 // *Global Environmental Change*. 2007. Vol. 17, No. 3-4. P. 485-497. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002.

16. Ahmad N.F.A., Nasir N.M., Yusop Z. Sensitivity analysis of FAO Penman-Monteith reference evapotranspiration to climatic variables // *Jurnal Teknologi*. 2017. Vol. 79, No. 6. P. 63-69. DOI: 10.11113/jt.v79.8377.

17. Horn R., Domžal H., Słowińska-Jurkiewicz A., van Ouwerkerk C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils // *Soil & Tillage Research*. 1995. Vol. 35, No. 1-2. P. 23-36. DOI: 10.1016/0167-1987(95)00479-C.

18. Daryanto S., Wang L., Jacinthe P.A. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review // *Agricultural Water Management*. 2017. Vol. 179. P. 18-33. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.04.022.

19. Longepierre M., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction // *Soil Biology and Biochemistry*. 2021. Vol. 160. P. 108349. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108349.

20. Whalen J.K., Hamel C. Effects of key soil organisms on nutrient dynamics in temperate agroecosystems // *Journal of Crop Improvement*. 2008. Vol. 22, No. 1. P. 1-28. DOI: 10.1080/15427520801911397.

21. Asseng S., Ewert F., Martre P. et al. Rising temperatures reduce global wheat production // *Nature Climate Change*. 2015. Vol. 5. P. 143-147. DOI: 10.1038/nclimate2470.

Информация об авторах

Ирина Николаевна Гаспарян, д-р с.-х. наук, профессор, гл. научный сотрудник лаборатории Географической сети опытов и цифровых агротехнологий, SPIN-код: 3354-1594, AuthorID: 362785, ORCID: 0000-0003-4702-0095; irina150170@yandex.ru

Ольга Николаевна Ивашова, канд. с.-х. наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; SPIN-код: 7080-8591, AuthorID: 705761, ORCID: 0000-0001-9206-9862, o.ivashova@rgau-msha.ru

Шаген Вагенович Гаспарян, канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры технологии хранения и переработки плодово-овощной и растениеводческой продукции Технологического института РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; SPIN-код: 9014-5774, AuthorID: 756518, ORCID: 0000-0001-7161-3654, gas_shag@rgau-msha.ru

Наталья Федоровна Денискина, канд. биол. наук, доцент кафедры защиты растений Агробиотехнологического института РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; SPIN-код: 8642-6850, AuthorID: 767574, ORCID: 0000-0003-3111-6869, ndeniskina@rgau-msha.ru

Information about the authors

Irina N. Gasparyan, D.Ss (Agro), Professor, Chief Researcher, Laboratory of Geographic Network of Experiments and Digital Agricultural Technologies, SPIN code: 3354-1594, AuthorID: 362785, ORCID: 0000-0003-4702-0095; irina150170@yandex.ru

Olga N. Ivashova, CSs (Agro), Associate Professor, Department of Computer-Aided Design Systems and Engineering Calculations, A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; SPIN code: 7080-8591, AuthorID: 705761, ORCID: 0000-0001-9206-9862, o.ivashova@rgau-msha.ru

Shagen V. Gasparyan, CSs (Agro), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Storage and Processing of Fruit and Vegetable and Plant Products, Technological Institute of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; SPIN code: 9014-5774, AuthorID: 756518, ORCID: 0000-0001-7161-3654, gas_shag@rgau-msha.ru

Natalia F. Deniskina, CSs (Biology), Associate Professor of the Department of Plant Protection, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; SPIN code: 8642-6850, AuthorID: 767574, ORCID: 0000-0003-3111-6869, ndeniskina@rgau-msha.ru

Заявленный вклад авторов

Вклад всех авторов равнозначен и охватывает все этапы работы над обзором: разработку концепции и структуры статьи, проведение библиографического поиска, критический анализ публикаций, обобщение результатов и написание текста.

Конфликт интересов / Criteria of authorship

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 12.03.2026

Поступила после рецензирования / Received 14.04.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 17.04.2026

Declared contribution of the authors

The contributions of all authors are equal and encompass all stages of the review process: developing the article's concept and structure, conducting the literature search, critically analyzing publications, synthesizing the results, and writing the text.