

**Снижение экологических рисков применения мобильных энергонасыщенных агрегатов
при возделывании семенного картофеля с учетом закономерности тепло
и влагопереноса внутри корнеобитаемого слоя почвы**

**Андрей Борисович Калинин, Игорь Зиновьевич Теплинский, Вячеслав Анатольевич Ружьев,
Павел Михайлович Шпиганович, Юлия Игоревна Смирнова**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Санкт-Петербург-Пушкин,
Россия

e-mail: andrkalinin@yandex.ru

Аннотация. Ввиду того, что картофель является культурой требовательной к условиям влагообеспечения, то его урожайность зависит от возможности в период вегетации использовать корневой системой влагу, накопленную в течение календарного года. Однако интенсификация технологических приемов производства картофеля с использованием мощных энергонасыщенных мобильных сельскохозяйственных агрегатов приводит к существенному ухудшению почвенного состояния за счет переуплотнения пахотного и подпахотного горизонтов, что препятствует нормальному режиму движения внутрипочвенной влаги и развитию корневой системы растений. Снижение числа проходов сельскохозяйственных агрегатов по полю возможно при использовании комбинированных агрегатов, выполняющих за один проход несколько технологических процессов. С этой целью в СПбГАУ разработан многофункциональный комбинированный картофелепосадочный агрегат, который совмещает предпосадочную обработку почвы, посадку семян картофеля, применения агрохимикатов, пестицидов и влагоудерживающих препаратов, а также глубокое рыхление междурядий и формирование полнообъемных гребней. Проведенные исследования показали эффективность применения такого комбинированного агрегата за счет обеспечения благоприятных почвенных условий для роста и развития растений.

Ключевые слова: семенной картофель; комбинированный агрегат; влагообеспеченность; тепло- и влагоперенос; твердость почвы; влагоудерживающий препарат.

Для цитирования: Калинин А. Б., Теплинский И. З., Ружьев В. А., Шпиганович П. М., Смирнова Ю. И. Снижение экологических рисков применения мобильных энергонасыщенных агрегатов при возделывании семенного картофеля с учетом закономерности тепло и влагопереноса внутри корнеобитаемого слоя почвы // Аграрный научный журнал. 2023. № 5. С. 132–139. [http: 10.28983/asj.y2023i5pp132-139](http://10.28983/asj.y2023i5pp132-139).

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Reducing the environmental risks of using mobile energy-saturated units during seed potatoes growing taking into account the patterns of heat and moisture transfer within the root spreading zone in the soil

Andrey B. Kalinin, Igor Z. Teplinsky, Vyacheslav A. Ruzhev, Pavel M. Shpiganovich, Julia I. Smirnova

St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg-Pushkin, Russia

e-mail: andrkalinin@yandex.ru

Abstract. Because potato is a crop, demanding moisture supply conditions its yield depends on the ability to use the moisture accumulated during the calendar year by the root system during the growing season. However, the intensification of technological methods of potato production using powerful energy-saturated mobile agricultural units leads to a significant deterioration of the soil condition due to over compaction of the arable and sub-soil horizons which hinders the normal mode of movement of intrasoil moisture and the development of the root system of plants. Reducing the number of passes of agricultural units across the field is possible when using combined units that perform several technological processes in one pass. For this purpose, a multifunctional combined potato-planting unit has been developed at St. Petersburg State Agrarian University that combines preplant tillage, planting potato seeds, the use of agrochemicals, pesticides and water-retaining agents, as well as deep loosening of interrow spacing and the formation of full-volume ridges. The conducted studies have shown the effectiveness of the use of such a combined unit by providing favorable soil conditions for the growth and development of plants.

Keywords: seed potatoes; combined unit; moisture supply; heat and moisture transfer; soil hardness; humectant.



Введение. Картофель является культурой требовательной к условиям влагообеспечения корневой системы. Его урожайность и качество клубней во многом зависят от возможности использовать влагу корневой системой картофеля, накопленной в течение календарного года и потребляемой только в период вегетации растений, в случае свободного проникновения ее в нижние горизонты корнеобитаемого слоя [1]. Однако интенсификация технологических приемов производства картофеля с использованием мощных энергонасыщенных мобильных сельскохозяйственных агрегатов приводит к существенному ухудшению почвенного состояния за счет переуплотнения пахотного и подпахотного горизонтов, что препятствуют нормальному режиму движения внутрипочвенной влаги и развитию корневой системы растений [2, 3]. Поэтому в период выпадения избыточных осадков присутствие переуплотнения внутри почвы создает риски возникновения водной эрозии и гибели растений от переувлажнения при наличии даже незначительных уклонов на поле [4, 5]. Наиболее высокая интенсивность уплотнения почвы наблюдается в период выполнения весенних полевых работ, когда почвенные горизонты обладают повышенной влажностью [6]. На рис. 1 представлены оценки твердости почвы в корнеобитаемом слое по следу колес картофелепосадочного агрегата после завершения технологических процессов предпосадочной обработки (кривая 1) и посадки (кривая 2).

Анализ графического материала, приведенного на рис. 1 показал, что уплотняющее воздействие от опорно-приводных колес картофелепосадочной машины (рис. 1, а) и от колес трактора (рис. 1, б) приводит к повышению твердости почвы в корнеобитаемом слое выше критического значения, равного 4,5 МПа, при котором развитие корневой системы картофеля становится невозможным [7]. При таком переуплотнении корнеобитаемого слоя происходит существенное уменьшение объема пор и капилляров, по которым происходит перемещение почвенной влаги [8].

Снижение числа проходов сельскохозяйственных агрегатов по полю возможно при использовании комбинированных агрегатов, выполняющих за один проход несколько технологических

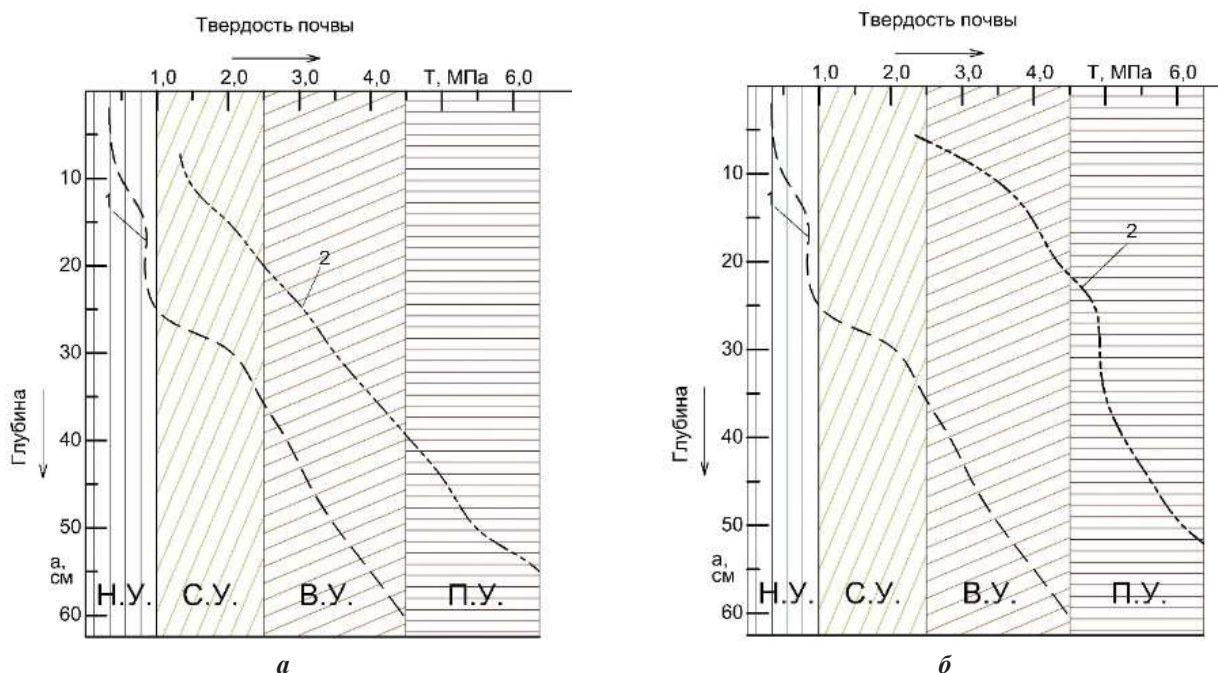


Рис. 1. Оценки твердости почвы в корнеобитаемом слое после завершения технологических процессов предпосадочной обработки почвы и посадки: а – по следу колеса картофелепосадочной машины; б – по следу колеса трактора; Н.У., С.У., В.У., П.У. – зоны нормального, среднего, высокого и предельного уплотнения почвы для картофеля





процессов [8, 9]. С этой целью в СПбГАУ разработан многофункциональный комбинированный картофелепосадочный агрегат, технологическая схема которого показана на рис. 2 [10]. Этот агрегат совмещает предпосадочную обработку почвы, посадку семян картофеля, применения агрохимикатов, пестицидов и влагоудерживающих препаратов, а также глубокое рыхление междурядий и формирование полнообъемных гребней.

Методика исследований. Внутри почвенного массива существует большое количество мелких пор и капилляров, пронизывающих его преимущественно в вертикальном направлении. Такое поровое пространство почв естественного сложения, как правило, заполнено почвенным раствором, имеющим определенную степень мобильности. Известно, что стенки капиллярного канала имеют определенный электрический потенциал ϕ , который зависит от температуры T (рис. 3) [11]. При возникновении разницы температур по длине канала $T_{II} > T_I$ электрический потенциал его стенок также будет иметь различные значения, уменьшающиеся по мере снижения температуры. На некотором расстоянии от стенок каналов, которое также варьируется в зависимости от температуры, возникает зона равного электрического потенциала. За пределами этой зоны внутри капилляра образуется естественное электрическое поле E , направление которого обратно градиенту температур (рис. 4). Под действием этого электрического поля в центре капилляра, заполненного почвенным раствором, ионы солей, которые являются переносчиком

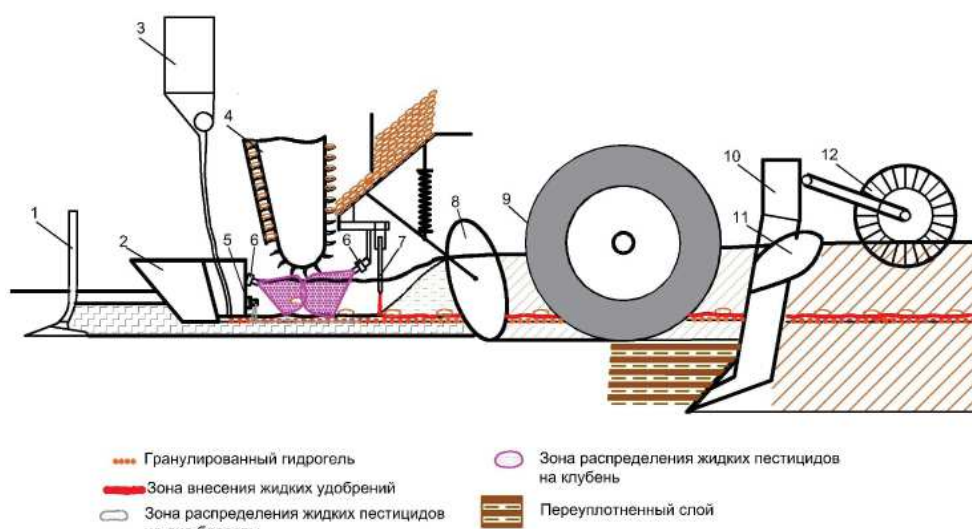


Рис. 2. Технологическая схема комбинированного агрегата:

1 – стрельчатая лапа, 2 – сошник, 3 – устройство для внесения гранулированных препаратов, 4 – высаживающий аппарат, 5 – распылитель для обеззараживания дна борозды, 6 – распылители для обработки клубней, 7 – жиклер для подачи жидких удобрений, 8 – заделывающие диски, 9 – опорно-приводное колесо, 10 – глубокорыхлитель, 11 – гребнеобразующий корпус, 12 – профилированный прутковый каток

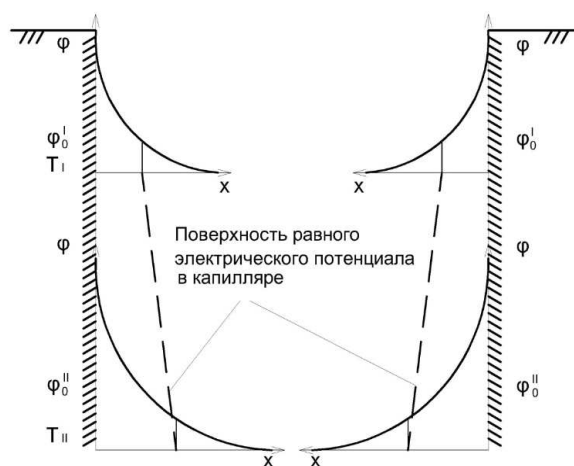


Рис. 3. Распределение электрических потенциалов внутри капиллярного канала

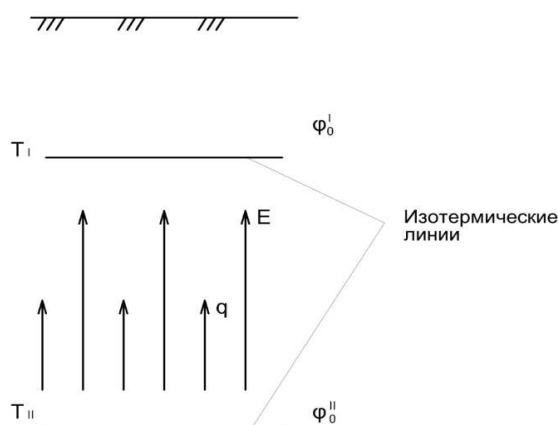


Рис. 4. Естественное электрическое поле E и поле движения почвенной влаги q



электричества, выполняют направленное движение в зону низких температур, увлекая за собой молекулы воды. Таким образом, градиент температур внутри почвенного массива под действием физических законов формирует в почвенном растворе, заполняющим его капилляры, естественное электрическое поле E , которое, в свою очередь инициирует поток почвенной влаги q в сторону более низких температур.

Таким образом, направление перемещения почвенного раствора внутри анизотермической капиллярной системы зависит от градиента температур в почвенном массиве, а интенсивность и мощность этого потока зависят от абсолютного значения этого показателя и объема модальной структуры порового пространства, отвечающего за влагоудерживающую способность почвы, соответственно. Поэтому с целью сохранения влаги в корнеобитаемом слое необходимо создать условия, позволяющие снизить перепад температур по глубине за счет создания насыщенного воздухом рыхлого верхнего слоя почвы, который обладает низкой теплопроводностью. Поддержание такого состояния в течение всего вегетационного периода обеспечивает стабильное снабжение корневой системы водой, что снижает риски потерь урожая в период отсутствия осадков. Исследования показали [3], что почвенное состояние с низкой теплопроводностью обеспечивается при использовании машин с пассивными рабочими органами, формирующими крупнозернистую почвенную структуру, что не могут обеспечить машины с активными рабочими органами, широко используемые в интенсивных технологиях производства картофеля.

Для улучшения влагообеспечения растений в предлагаемом комбинированном агрегате предусмотрено технологическая система, обеспечивающая внесение в корнеобитаемый слой влагоудерживающих материалов одновременно с посадкой картофеля. Такие препараты поглощают избыточную влагу и удерживают внутри своей структуре [13, 14]. Корневая система растений в период вегетации проникает в насыщенный влагой материал и поглощает ее при недостатке запасов воды в почвенном массиве [15].

Для получения статистической информации о динамике изменения температурного и водного режимов почвы в период вегетации семенного картофеля были использованы цифровой измерительный комплекс, включающий метеостанцию и почвенные зонды (рис. 5), выполняющие мониторинг температуры и влажности почвы по горизонтам корнеобитаемого слоя толщиной 90 см с шагом $\Delta a = 10$ см. Анализ полученных в результате мониторинга экспериментальных данных проводился на основе результатов статистической обработки реализаций исследуемых параметров почвенного состояния.

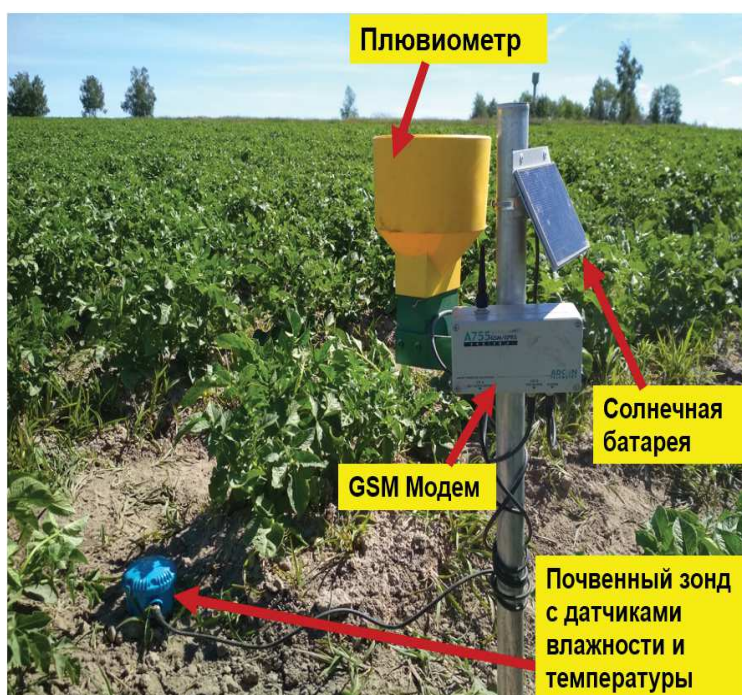


Рис. 5. Вид измерительного комплекса оценки параметров почвенного состояния



Оценка влияния предлагаемых технологических решений, которые направлены на снижение экологических рисков, проводилась в сравнении с технологическими приемами возделывания семенного картофеля по европейской технологии, широко используемой в семеноводческих хозяйствах нашей страны, на контрольных участках одного поля. Экспериментальные исследования проводились в условиях производственного опыта, а оценка экологических рисков выполнялась по таким показателям как: твердость почвы в корнеобитаемом слое; температура почвы в зоне клубнеобразования; запас продуктивной влаги на глубине 90 см; а эффективность применения влагоудерживающих препаратов оценивалась по сравнительной урожайности картофеля.

Результаты исследований. Результаты измерений процесса твердости почвы по следу колес трактора и посадочной машины через две недели после проведения посадки семенного картофеля с помощью разработанного комбинированного картофелепосадочного агрегата представлены на рис. 6. Полученные данные показали, что применение в составе агрегата глубокихрыхлительных лап позволило обеспечить разрушение уплотнений, сформированных ходовыми системами, на глубину до 30 см (для сравнения см. рис. 1). Согласно этих данных твердость почвы по следу ходовых систем агрегата (кривая 2) не превышает предельного значения для картофеля, составляющего 4,5 МПа, несмотря на некоторое повышение значений этого показателя на глубине 20–40 см относительно исходного состояния (кривая 1).

Применение в предлагаемом комбинированном агрегате рабочих органов пассивного типа [16] для формирования семенного ложа и гребневой поверхности поля позволило создать крупнозернистую структуру верхнего слоя почвы, насыщенную воздухом с более низкой степенью теплопроводности. В табл. 1 приведены оценки средних значений температуры $t_{\text{в}}$ наружного воздуха и почвы $t_{\text{п}}$ на глубине 15 см, а также амплитуда их колебания $\Delta t_{\text{в}}$ и $\Delta t_{\text{п}}$, вычисленные по результатам мониторинга, проведенного за весь вегетационный период семенного картофеля. Согласно этих данных гребень, сформированный пассивными рабочими органами, прогревается в меньшей степени по сравнению с гребнями, образованными активными рабочими органами. Средние значения амплитуды колебаний температуры почвы внутри гребней в случае применения пассивных рабочих органов оказалась меньше почти на 1,5 °С при одинаковом среднем значении перепада температур наружного воздуха. Стабилизация температурного режима в зоне клубнеобразования обеспечило снижение рисков для семенного картофеля от перегрева почвы и колебаний наружной температуры воздуха.

Таблица 1

Результаты статистической обработки температурных показателей воздуха и почвы после прохода пропашного культиватора

Тип пропашного культиватора-гребнеобразователя	Оценки средних значения температурных показателей, °С			
	$t_{\text{в}}$	$\Delta t_{\text{в}}$	$t_{\text{п}}$	$\Delta t_{\text{п}}$
С активными рабочими органами	20,4	12,84	20,3	4,93
С пассивными рабочими органами	20,4	12,84	19,8	3,68

Меньший нагрев верхнего слоя почвы в гребнях с более крупнозернистой структурой и повышенным содержанием воздуха, сформированных с помощью пассивных рабочих органов, способствует стабилизации влагообеспеченности растений. Об этом свидетельствуют данные, представленные в табл. 2, из которых видно, что снижение интенсивности миграции капиллярной влаги под действием градиента температур между верхним и нижним горизонтами корнеобитаемого слоя обеспечивает в период вегетации объем запасов влаги, доступной растениям.

Как уже отмечалось, другим способом, позволяющим снизить риски влияния погодных условий, является управления водным режимом почвы с помощью применения влагоудерживающих препаратов, вносимых в корнеобитаемый слой для накопления излишков влаги, выпадающей

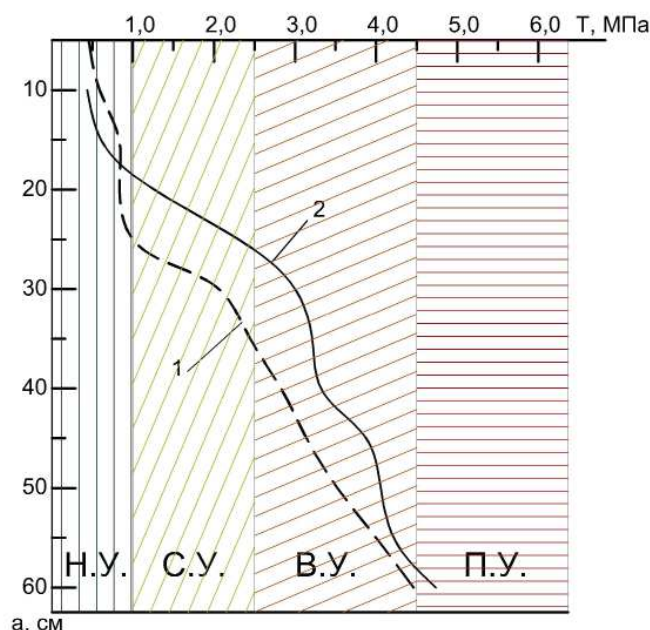


Рис. 6. Оценки твердости почвы в корнеобитаемом слое до и после посадки картофеля комбинированным картофелепосадочным агрегатом

Таблица 2

Оценки параметров почвенного состояния, сформированного при использовании различных рабочих органов для формирования гребней

Тип применяемых рабочих органов для гребнеобразования	Среднее значение суммарных запасов влаги в период вегетации, мм
Активные рабочие органы	147
Пассивные рабочие органы	198

с атмосферными осадками или при орошении. В предлагаемом комбинированном агрегате препарат Aquasorb в виде гранул вносился в зону клубнеобразования вместе с посадкой семян картофеля с нормой 40 кг/га. По результатам производственной проверки на контрольных участках поля отмечено существенная прибавка урожайности семенных клубней до 59,26 т/га против 45,51 т/га. При этом стабилизация режима влагообеспечения в течение вегетационного периода позволила получить не только большее количество клубней, но и их средневзвешенный размер. На рис. 7 представлен результат сравнения урожайности картофеля, убранного с 10 м² на контрольных участках в соответствии с принятой методикой.



Рис. 7. Результат сравнительной оценки урожайности семенного картофеля сорта Мадейра, полученного на контрольных участках с применением влагоудерживающего препарата и без него





Заключение. Представленные результаты исследований показали, что снизить экологические риски, связанные применением мобильных энергонасыщенных машинно-тракторных агрегатов в условиях нестабильных погодных явлений, возможно за счет рационального выбора агроприемов и технических средств. Для этих целей следует применять комбинированные агрегаты, позволяющие уменьшить количество проходов мобильных машин и орудий по полю, за счет совмещения с посадкой картофеля операций подготовки почвы и ухода. Для устранения зон переуплотнения при выполнении операции ухода за растениями следует использовать глубокое рыхление почвы с одновременным формированием полнообъемных гребней, применяя для этого рабочие органы пассивного типа. Это обеспечивает создание почвенного состояния, при котором твердость почвы не превышает предельного значения для картофеля, равного 4,5 МПа.

Результаты исследований показали также, что пассивные рабочие органы позволяют создать в верхнем слое почвы крупнозернистую структуру, насыщенную воздухом и способствующую установлению более стабильного водного и температурного режимов. Использование же рабочих органов активного типа повышает примерно на 1,5 °С среднюю амплитуду температуры в зоне клубнеобразования и снижает запасы влаги до 25 %.

Применение водоудерживающих материалов также обеспечило стабилизацию водного режима почвы, что позволило на контрольном участке получить прибавку урожая около 24 % за счет увеличения количества семенных клубней и их средневзвешенного размера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конкурентоспособные технологии семеноводства, производства и хранения картофеля / О. А. Старовойтова [и др.]. М., 2018. 236 с. ISBN 978-5-7367-1433-9.
2. Картофель: (возделывание, уборка, хранение) / Д. Шпаар [и др.]; под общ. ред. Д. Шпаара. 4-е изд., дораб. и доп. М., 2022. 439 с.
3. Kalinin A., Kalinina V., Teplinsky I., Ruzhev V. Selection and justification of potato inter row tillage systems based on development of dynamic model of heat and moisture transfer between soil layers // Engineering for Rural Development: 19, Jelgava, 20–22 мая 2020 года. Jelgava, 2020. P. 819-825. DOI 10.22616/ERDev.2020.19.TF191.
4. Калинин А. Б., Теплинский И. З. Методы и средства управления режимами влагообеспечения в технологии возделывания картофеля // Картофель и овощи. 2022. № 2. С. 28–32. DOI 10.25630/PAV.2022.11.32.004.
5. Маслов Г. Г., Малашихин Н. В., Лаврентьев В. П. Эффективные направления снижения уплотнения почвы для сохранения ее плодородия // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 146. С. 24–37. DOI 10.21515/1990-4665-146-003.
6. Землепользование России в условиях изменения глобального климата и беспрецедентных социально-экономических вызовов: состояние почвенного (земельного) покрова, тенденции изменения, деградация, методология учета, прогнозы / А. Л. Иванов [и др.]. М., 2022. 100 с. ISBN 978-5-6047604-3-7. DOI 10.52479/978-5-6047604-3-7.
7. Медведев В. В. Твердость почвы. Харьков, 2009. 152 с.
8. Kalinin A., Teplinsky I., Ustroeв A. Substantiation of tillage methods aimed at rational usage of water resources // Engineering for Rural Development: Proceedings, Jelgava, 23–25 мая 2018 года. Vol. 17. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2018. P. 392-399. DOI 10.22616/ERDev2018.17.N517.
9. Современные проблемы науки и производства в агроинженерии / Л. В. Бобрович [и др.]. СПб., 2013. 496 с. ISBN 978-5-8114-1356-0.
10. Методы и средства снижения технологических рисков при функционировании оборудования для применения средств химизации комбинированных картофелепосадочных машин / А. Б. Калинин [и др.] // Аграрный научный журнал. 2022. № 8. С. 76–81. DOI 10.28983/asj.y2022i8pp76-81.
11. Калинин А. Б., Теплинский И. З., Теймуров Т. Ш. Совершенствование методов и средств снижения технологических рисков при функционировании машин для возделывания картофеля // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2021. № 1(62). С. 178–190. DOI 10.24412/2078-1318-2021-1-178-190.
12. Дыдышко П. И. Земляное полотно железнодорожного пути. М., 2014. 416 с.
13. Данилова Т. Н. Влияние гидрогелей на показатели структуры урожая зерновых культур в условиях модельной почвенной засухи «засушник» и в полевых // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2021. № 3(64). С. 31–39. DOI 10.24412/2078-1318-2021-3-31-39.

14. Влияние концентрата глауконитовых песков на продуктивность картофеля / М. Е. Дыйканова [и др.] // Картофель и овощи. 2020. № 4. С. 33–36. DOI 10.25630/PAV.2020.44.51.006.
15. Калинин А. Б., Смелик В. А., Теплинский И. З. Совершенствование технологического процесса функционирования устройства для применения водоудерживающих материалов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2020. № 60. С. 118–124. DOI 10.24411/2078-1318-2020-13118.
16. Сельскохозяйственные машины / В. Е. Бердышев [и др.]. СПб, 2022. 315 с. ISBN 978-5-6046442-8-7.

REFERENCES

1. Competitive technologies of seed production, production and storage of potatoes / O.A. Starovoitova et al. Moscow, 2018: 236 p. ISBN 978-5-7367-1433-9. (In Russ.).
2. Potatoes: (cultivation, harvesting, storage) / D. Shpaar et al., under total ed. D. Spaara. 4th ed., revised. and additional. Moscow, 2022. 439 p. (In Russ.).
3. Kalinin A., Kalinina V., Teplinsky I., Ruzhev V. Selection and justification of potato inter row tillage systems based on development of dynamic model of heat and moisture transfer between soil layers. *Engineering for Rural Development*. 19, Jelgava, May 20–22, 2020. Jelgava, 2020: 819–825. DOI 10.22616/ERDev.2020.19.TF191.
4. Kalinin A. B., Teplinsky I. Z. Methods and means of controlling moisture supply regimes in potato cultivation technology. *Potatoes and vegetables*. 2022; 2: 28–32. DOI 10.25630/PAV.2022.11.32.004. (In Russ.).
5. Maslov G. G., Malashihin N. V., Lavrentiev V. P. Effective ways to reduce soil compaction to preserve its fertility. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. 2019; 146: 24–37. DOI 10.21515/1990-4665-146-003. (In Russ.).
6. Land use in Russia in the context of global climate change and unprecedented socio-economic challenges: the state of the soil (land) cover, trends in change, degradation, accounting methodology, forecasts / A. L. Ivanov et al. Moscow, 2022. 100 p. ISBN 978-5-6047604-3-7. DOI 10.52479/978-5-6047604-3-7. (In Russ.).
7. Medvedev V.V. Soil hardness. Kharkov, 2009. 152 p.
8. Kalinin A., Teplinsky I., UstroeV A. Substantiation of tillage methods aimed at rational use of water resources. *Engineering for Rural Development: Proceedings*, Jelgava, May 23–25, 2018. Vol. 17. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2018: 392–399. DOI 10.22616/ERDev2018.17.N517.
9. Modern problems of science and production in agroengineering / L. V. Bobrovich et al. SPb., 2013: 496 p. ISBN 978-5-8114-1356-0. (In Russ.).
10. Methods and means of reducing technological risks during the operation of equipment for the use of chemicalization means for combined potato planters / A. B. Kalinin et al. *The agrarian scientific journal*. 2022; 8: 76–81. DOI 10.28983/asj.y2022i8pp76-81. (In Russ.).
11. Kalinin A. B., Teplinsky I. Z., Teymurov T. Sh. Improvement of methods and means of reducing technological risks in the operation of machines for growing potatoes. *Bulletin of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2021; 1(62): 178–190. DOI 10.24412/2078-1318-2021-1-178-190. (In Russ.).
12. Dydyshko P.I. The earthen bed of the railway track. Moscow, 2014. 416 p. (In Russ.).
13. Danilova T. N. Influence of hydrogels on the indicators of the structure of the yield of grain crops under the conditions of the model soil drought “drought” and in the field. *Bulletin of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2021; 3(64): 31–39. DOI 10.24412/2078-1318-2021-3-31-39. (In Russ.).
14. Effect of glauconite sand concentrate on potato productivity / M. E. Dyikanova et al. *Potatoes and vegetables*. 2020; 4: 33–36. DOI 10.25630/PAV.2020.44.51.006. (In Russ.).
15. Kalinin A. B., Smelik V. A., Teplinsky I. Z. Improving the technological process of functioning of a device for the use of water-retaining materials. *Bulletin of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2020; 60: 118–124. DOI 10.24411/2078-1318-2020-13118. (In Russ.).
16. Agricultural machines / V. E. Berdyshev et al. St. Petersburg, 2022. 315 p. ISBN 978-5-6046442-8-7. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 15.01.2023; одобрена после рецензирования 21.02.2023; принята к публикации 28.02.2023.

The article was submitted 15.01.2023; approved after reviewing 21.02.2023; accepted for publication 28.02.2023.

