

*На правах рукописи*

ЕВГРАФОВ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ТОРФЯНИКОВ  
С КОМПЛЕКСОМ МАШИН НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ПОЧВ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование  
для агропромышленного комплекса (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова».

**Научный консультант:** **Дидманидзе Отари Назирович**, доктор технических наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

**Официальные оппоненты:** **Варнаков Валерий Валентинович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет».

**Пухов Евгений Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая эксплуатация транспорта» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева».

**Гаджиев Парвиз Имран Оглы** доктор технических наук, профессор, декан факультета электроэнергетики и технического сервиса ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный заочный университет».

**Ведущая организация:** ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»

Защита состоится «15» июня 2023 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, Москва, ул. Прянишникова, д. 19.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 35.2.030.03,  
кандидат технических наук, доцент

Николай Николаевич Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Одной из важнейших задач государства является обеспечение продовольственной и экологической безопасности жизнедеятельности населения.

Торфяные пожары являются обычным явлением для территории Российской Федерации, имеющей одни из самых больших торфяных месторождений на планете. Они являются системным явлением, которое требует всестороннего анализа. Помимо огромного экономического ущерба торфяные пожары наносят колоссальный социально-экологический и экономический ущерб.

Пожары на торфяниках представляют собой почворазрушающий процесс, снижающий плодородие почв, ухудшающий условия производства продукции растениеводства, увеличивающий эрозионную опасность и ее интенсивность, и, как результат, вывод из сельскохозяйственного оборота плодородных земель.

В Нечерноземье осушаемые низинные торфяные почвы обладают высоким плодородием. Черный (или обыкновенный) способ освоения торфяных почв для выращивания сельскохозяйственной продукции в настоящее время получил наиболее широкое применение в России. Поверхность выработанного торфяника при черной культуре освоения открыта для возникновения торфяных пожаров. Процесс уничтожения осушенных торфяных почв имеет явную тенденцию быстрого роста.

Территория, охваченная пожаром, полностью лишается плодородного почвенного органогенного слоя мощностью от 0,5 до 1,2 м. Поверхность пожара почти не занята растительностью и подвержена активной ветровой эрозии. Все пирогенные образования при использовании в сельскохозяйственном производстве находятся в неблагоприятных условиях.

**Степень разработанности поставленных проблем.** Теоретико-методологической основой диссертационного исследования послужили фундаментальные работы отечественных и зарубежных специалистов по сельскохозяйственной, экологической и социально-экономической проблематике; положения, представленные в трудах современных российских и зарубежных авторов, посвященные вопросам изучения торфяных пожаров, воздействию на плодородие торфяных почв, генезису их происхождения, оценке эколого-социальных, экономических последствий и способов их предупреждения.

**Целью исследования** является разработка моделей самовозгорания и вынужденного зажигания торфяных почв, и мероприятий с применением комплекса машин для предотвращения торфяных пожаров на сельскохозяйственных землях.

### **Задачи исследования:**

1. Дать оценку последствиям торфяных пожаров на землях сельскохозяйственного назначения.
2. Выполнить натурные и экспериментальные исследования теплофизических процессов самовозгорания и вынужденного зажигания торфяной почвы в лабораторных и полевых условиях.
3. Разработать математические модели процессов самовозгорания и вы-

нужденного зажигания торфа на основе полученных данных в зависимости от основных факторов, таких как: влажность, температура, объемная плотность торфа.

4. Обосновать и подобрать комплекс машин для изменения теплофизических свойств торфяной почвы с целью исключения возникновения торфяных пожаров и защиты сельскохозяйственных земель от пирогенной деградации и снижения плодородия.

5. Разработать систему мониторинга противопожарной опасности на выработанных торфяниках при их сельскохозяйственном использовании.

**Объект исследования** – торфяные пожары на выработанных торфяниках при их введении и использовании в сельскохозяйственном обороте, и прилегающие к ним территории.

**Предметом диссертационного исследования** является комплекс методов и способов мониторинга за пожароопасной ситуацией на торфяниках, мероприятий по их предупреждению, при проведении культуртехнических мероприятий для введения и использования выработанных торфяников в сельскохозяйственном обороте для получения продукции растениеводства.

**Научная новизна исследования** состоит в постановке и решении крупной научной проблемы – разработка системы предотвращения и мониторинга пожароопасной ситуации на торфяниках при их вовлечении в сельскохозяйственный оборот, которая невозможна без знания условий и причин их возникновения, динамики и учета послепожарных последствий, разносторонней оценки современного состояния выработанных торфяников, используемых и вводимых в производство продукции растениеводства, тенденций и их динамики.

К числу основных результатов, определяющих новизну диссертационного исследования, относятся:

1. Дана оценка последствиям торфяных пожаров на землях сельскохозяйственного назначения.

2. Получены и обобщены экспериментальные данные о теплофизических процессах самовозгорания торфяной почвы в лабораторных и полевых условиях.

3. Получены соотношения между основными факторами, оказывающими влияние на теплофизические процессы самовозгорания и зажигания от нагретых тел торфяной почвы (влажностью, насыщенностью кислородом, объемной плотностью).

4. Дана оценка перехода торфяной почвы сельскохозяйственных угодий в пожароопасное состояние по соотношению протекающих в них теплофизических процессов.

5. Разработаны математические модели самовозгорания торфяной почвы.

6. Обоснован и подобран комплекс машин для изменения теплофизических свойств торфяной почвы с целью исключения возникновения торфяных пожаров и защиты сельскохозяйственных земель от пирогенной деградации.

7. Разработан новый способ мониторинга за пожароопасностью торфяных почв вовлеченных в сельскохозяйственный оборот.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что:

– в результате проведения экспериментальных исследований получен

практический материал о теплофизических процессах самовозгорания и вынужденного зажигания торфяных почв, вовлеченных в сельскохозяйственный оборот;

- разработаны математические модели, позволяющие прогнозировать возникновение торфяных пожаров на сельскохозяйственных землях до их возникновения;

- разработан программный комплекс для ЭВМ, в котором реализованы результаты проведенных исследований и математические модели, предназначенный для обработки и анализа информации о состоянии торфяных почв в реальном режиме времени для оценки возникновения пожароопасной ситуации на торфяниках;

- разработаны, произведены и сертифицированы в ОС «СИСТЕМ-ТЕСТ» ФГУ «ЦСА ОПС» МВД России для серийного выпуска конструктивные элементы новой системы мониторинга за пожароопасной ситуацией, контроллеры возгорания, предназначенные для размещения на местности и получения входящих данных для программного комплекса;

- создан новый способ мониторинга за пожароопасной ситуацией на землях сельскохозяйственного назначения, позволяющий предотвратить возникновение торфяных пожаров и не допустить пирогенную деградацию почв, вывод их из сельскохозяйственного оборота;

- подобраны технологические операции с комплексом машин, позволяющие изменить теплофизические свойства торфяных почв и восстановить капиллярную связь с грунтовыми водами, для исключения возможности возникновения пожаров на торфяных почвах.

**Теоретическая значимость** результатов диссертационного исследования заключается в том, что полученные теоретические и методические разработки, выводы и практические рекомендации по формированию системы предупреждения торфяных пожаров, процесса моделирования и горения торфяников могут использоваться министерствами и ведомствами РФ, а также правительствами субъектов России для обеспечения научной и методической основы рационального ведения хозяйств в контексте теории устойчивого развития, а также социально-экономических программ предупреждения и ликвидации последствий и снижения эколого-экономического ущерба от торфяных пожаров.

**Методология и методы исследования.** В процессе диссертационного исследования в соответствии с требованиями научной методологии системного подхода использованы проверенные и наиболее распространенные приемы и методы экспериментальных исследований. Применены следующие методы исследования: исторический, сравнительный, экономико-статистический, картографический, метод экспертных оценок, корреляционный анализ, аналитический, абстрактно-логический, расчетно-конструктивный, математического моделирования, графический. В качестве основных нормативных документов в работе использовались законодательно-нормативные акты Российской Федерации.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математические модели самовозгорания и вынужденного зажигания

торфяной почвы при температурах выше критических в лабораторных условиях.

2. Математические модели самовозгорания и вынужденного зажигания торфяной почвы при температурах ниже критических в лабораторных условиях.

3. Математические модели самовозгорания и вынужденного зажигания торфяной почвы сельскохозяйственных угодий в естественных условиях.

4. Технические мероприятия на торфяниках с применением комплекса машин при их вовлечении и использовании в сельскохозяйственном обороте для изменения их теплофизических свойств как наиболее эффективного способа предотвращения пирогенной деградации и потери (снижения) плодородия торфяных почв.

5. Новый способ мониторинга на торфяниках за пожароопасной ситуацией и эффективности применяемых мероприятий на землях сельскохозяйственного назначения.

**Степень достоверности и апробации результатов** заключается в том, что положения диссертационной работы вошли в Концепцию региональной целевой программы «Предотвращение и ликвидация возгорания торфяников и торфяных почв Московской области» (2010 г.), использовались при разработке стандарта организации «Правила эксплуатации комплекса гидротехнических сооружений систем обводнения торфяников Московской области» Государственного казенного учреждения Московской области «Московская областная специализированная аварийно-восстановительная служба» (2012 г.). На прибор для мониторинга температурного состояния торфяников – контроллер возгораний «Леший» – получен сертификат соответствия в ОС «СИСТЕМ-ТЕСТ» ФГУ «ЦСА ОПС» МВД России для его серийного выпуска. Результаты диссертационного исследования использованы в учебно-образовательном процессе при подготовке ряда экологических и инженерно-технических дисциплин РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. В 2021 г. запроектированы и проведены работы по рекультивации торфяной почвы с целью изменения ее теплофизических свойств для предотвращения возникновения торфяных пожаров компанией ООО «Инженерный центр Мосты и тоннели» в Рязанской области. Результаты работы использованы компанией ООО «ЭКОСТРОЙПРОГРЕСС» при утилизации торфяной почвы чрезвычайно опасной категории загрязнения на полигоне, что позволило предотвратить возникновение процесса самовозгорания при ее хранении.

Система мониторинга торфяных почв «Леший» в стационарном и мобильном вариантах демонстрировалась на научно-практической выставке «День инноваций» МЧС России и удостоена диплома выставки; на выставке «Пожарная безопасность XXI века» (Москва, Крокус Экспо); на 14-й Международной выставке «Машины, оборудование, инструменты, приборы и принадлежности для деревообрабатывающей, мебельной, лесной и целлюлозно-бумажной промышленности» в рамках Круглого стола «Перспективные направления в охране лесов и роль общественных организаций в сохранении лесных ресурсов планеты» (Москва, Экспоцентр); на выставке «Предупрежде-

ние и ликвидация ЧС. Пожарная безопасность. Средства спасения» (г. Нижний Новгород), международных конференциях РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Получено 6 свидетельств о регистрации права на интеллектуальную собственность (патенты РФ № 67872, № 78033, № 88970, № 106542, № 124176, № 2767075).

**Публикация результатов исследований.** Основные положения диссертации нашли отражение в 51 научной работе, в том числе: 22 в ведущих рецензируемых журналах, определенных ВАК Минобрнауки РФ; 19 в РИНЦ, 2 монографии, 6 свидетельств на интеллектуальную собственность; 2 в Scopus.

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из общей характеристики работы, 7 глав, заключения, рекомендаций производству, библиографического списка, а также 13 приложений. Работа изложена на 255 страницах, содержит 40 таблиц и 55 рисунков. Библиографический список включает 298 наименований, из которых 29 источников на иностранных языках.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### **Глава 1. Использование выработанных торфяников в сельском хозяйстве**

Среди полезных ископаемых в России большую часть занимают торфяные месторождения. Дефицит веществ органического происхождения в почвах на большей части Российской Федерации, в том числе и черноземных, привел к интенсивному использованию торфяных месторождений в качестве сельскохозяйственных угодий.

Наиболее экономически эффективным является использование выработанных торфяников под сельскохозяйственное использование с последующим производством растениеводческой продукции.

На выработанных торфяниках присутствует мелиоративная осушительная система, поэтому их вовлечение в сельскохозяйственный оборот регламентируется Государственной программой эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 14 мая 2021 г. № 731. На достижение этих целей из федерального бюджета до 2031 г. предполагается выделить более 500 млрд рублей. Ответственным исполнителем госпрограммы назначено Министерство сельского хозяйства РФ.

При производстве работ по рекультивации выработанных и нарушенных торфяников необходимо выполнять следующие операции: планировка территории и удаление пней, древесных остатков, камней; срезка бровок каналов на площадях; обеспечение сохранности и поддержание в рабочем состоянии осушительной системы и гидротехнических сооружений. Повторное использование торфяников целесообразно под земли сельскохозяйственного назначения.

На осушенных торфяных почвах в настоящее время используют четыре вида освоения для производства сельскохозяйственной продукции: смешанное пескование (или северное, шведское); покровное (насыпное или римпауское);

немецкое смешаннослойное; черная культура.

Осушаемые торфяные почвы в России в настоящее время преимущественно используют для возделывания пропашных и зерновых в условиях черной культуры земледелия. Черной культурой земледелия на осушаемых торфяных почвах называют их использование для возделывания зерновых, овощных и других сельскохозяйственных растений без защитного песчаного покрытия поверхности и посева многолетних трав, который получил наиболее широкое применение в России и наиболее подвержен возникновению торфяных пожаров.

Процесс уничтожения осушенных торфяных почв имеет явную тенденцию быстрого роста, в России площадь мелиорированных земель уменьшилось до 5 % от общей площади сельскохозяйственных земель, в том числе и по причине торфяных пожаров.

Площадь пирогенных образований составляет до 50...60 % выгоревшей территории сельскохозяйственных угодий. Территория, охваченная пожаром, полностью лишается плодородного почвенного органогенного слоя мощностью от 0,5 до 1,2 м.

Пирогенные образования обладают низким плодородием, сельскохозяйственное производство на них возможно только после внесения значительных масс органических (до 100...150 т/га) и минеральных удобрений, а также известкования, что требует больших материальных и экономических затрат.

## **Глава 2. Объект и методы исследования**

Самовозгорание твердых дисперсных, пористых и волокнистых органических материалов вызывается за счет окисления атмосферным воздухом. Окислительные процессы экзотермичны, что сопровождается накоплением теплоты в реагирующей массе. Особенность окислительных процессов при самовозгорании заключается в том, что они самоускоряются.

В результате химической и энергетической неоднородности склонность к самовозгоранию одних и тех же материалов неодинакова и характеризуется различными значениями кинетических параметров. Такими свойствами обладает торф.

Основу современных научных представлений о тепловом самовоспламенении заложил Вант-Гофф. Он указал, что самовоспламенение нарушением равновесия (в сторону тепловыделения) между теплоприходом и теплоотводом  $V_1 > V_2$ .

Однако количественного определения условий теплового самовоспламенения Вант-Гофф не дал. Первым эту задачу решил отечественный ученый, лауреат Нобелевской премии, академик Н.Н. Семёнов.

Недостаток модели Семёнова состоял в том, что температура во всей реагирующей массе горячего вещества (смеси) им принималась одинаковой.

Этот недостаток первым выявил и устранил отечественный ученый Д.А. Франк-Каменецкий.

Исследования ученых ВНИИПО Борисова, Кондратьева, Удилова, а также английского ученого Томаса и японских – Кинбарры и Акиты показали, что с



математической точки зрения самовозгорание и самовоспламенение – аналогичные явления. Однако процесс самовозгорания может характеризоваться небольшой энергией активации и, как результат, большими критическими разогревами. Поэтому применительно к самовозгоранию теория Франк-Каменецкого оказалась недостаточной.

Как показано американскими исследователями, изучавшими тление целлюлозных стержней в кислородосодержащих газах, скорость тления практически пропорциональна концентрации кислорода. При изменении концентрации кислорода от 21 до 96 % наблюдаемая ими линейная скорость тления возрастала примерно в три раза. Для возникновения самораспространяющегося горения необходимо, чтобы при поджигании сформировалась самораспространяющаяся волна горения.

Самым управляемым и вместе с тем наиболее эффективным, является водный режим почвы, который воздействует на все остальные режимы, такие как воздушный, тепловой и питательный, а также на различные свойства почв, водно-физические, теплофизические и химические характеристики.

Изменение водного режима торфяной почвы сопровождается изменением водно-физических свойств, гидротермических характеристик, водоаккумулирующей емкости зоны аэрации (при изменении УГВ). При снижении влажности торфяной почвы увеличивается ее воздухоемкость и воздухопроницаемость, что приводит к развитию окислительных процессов. Чем глубже опускается уровень грунтовых вод, тем больше воздуха поступает из атмосферы в зону аэрации.

Самовозгоранием называется явление «самопроизвольного» возникновения тления и горения дисперсного и пористого твердого материала или жидкости, которой пропитан твердый материал. Самовозгорание заканчивается тлением или проходит через данную стадию. Под самовоспламенением понимают аналогичное явление, возникающее в паро- и газообразной среде или конденсированных взрывчатых веществах без стадии тления. Зажигание – явление возникновения горения от внешних нагретых до высоких температур тел или от пламени, сопровождающееся возникновением волны пламенного горения или тления.

Принципиальное отличие первого режима от второго состоит в том, что при самовозгорании первоначальный очаг горения возникает внутри скопления горючего материала (горючей среды) и процесс сопровождается прогрессивным разогревом всей массы. При зажигании очаг горения появляется вблизи места воздействия тела, нагретого до высокой температуры, и процесс сопровождается возникновением волны горения или тления.

По сравнению с самовозгоранием при зажигании условия теплоотвода более жесткие, поэтому зажигание происходит при температурах более высоких, чем самовозгорание.

Температура зажигания  $T_z$ , вызывающая тление, достаточно низка. Критическая температура зажигания обезвоженного торфа составляет менее 200 °С. В результате низкой температуры зажигания торф может загораться в сухую летнюю погоду от искры, окурков, выхлопных систем машин, или самовозго-

раться.

Чем меньше плотность среды, тем короче длина волны горения, в ней содержится больше окислителя, в результате чего скорость распространения горения значительно выше. Применительно к торфяным почвам можно сделать заключение, что при иссушении верхнего слоя торфяной почвы происходит его разуплотнение и, как следствие, обогащение кислородом в результате понижения уровня грунтовых вод, что приводит к более быстрому формированию самораспространяющейся волны горения и уменьшению времени зажигания верхнего слоя торфяной почвы.

Торфяные почвы характеризуются, в естественном сложении и водном питании, высокой теплоемкостью и высокой теплопроводностью. Понижение уровня грунтовых вод приводит к изменению их теплового режима, что связано с увеличением воздушной фазы почвы.

Уплотнение почвы приводит к увеличению теплопроводности в результате уменьшения содержания в ней воздуха, являющегося более слабым проводником тепла, чем минеральная часть почвы.

### **Глава 3. Результаты лабораторных и полевых исследований теплофизических процессов самовозгорания торфяных почв**

Целью проведения экспериментальных исследований являлось определение склонности к самовозгоранию образцов торфа при различной их влажности и плотности. В процессе проведения ряда опытов определялись такие характеристики, как:

- время, через которое происходило самовозгорание образцов торфа в зависимости от насыщенности их влагой;
- влияние различного объемного веса образцов на время возникновения эффекта самовозгорания.

Для проведения опытов использовался сушильный шкаф марки СНОЛ-3,5 с объемом рабочей камеры, согласно рекомендациям, 40 л и возможностью изменения температуры от 0 до 350 °С. Исследуемые образцы торфа помещались в контейнеры К-30 цилиндрической формы, изготовленные из латунной сетки № 8 с высотой и диаметром 30 мм без проволочного каркаса.

Температура в сушильном шкафу измерялась в нескольких точках тремя термопарами ТПК 011-0,5/1,5 с диаметрами электродов 0,5 мм и диапазоном измерения температур –40...+800 °С, с термоизоляцией.

Для записи показаний термопар использовался четырехканальный измеритель-регистратор марки ИС-203.4, к которому через нормирующие усилители НУ-02 с диапазоном рабочих температур 0...900 °С и выходным сигналом в виде постоянного тока 4...20 мА присоединялись термопары ТПК 011-0,5/1,5. Измеритель-регистратор ИС-203.4 через модуль ПС-2 и разъем RS-485 передавал данные с термопар на персональный компьютер. Схема установки в сборе представлена на рисунке 1.

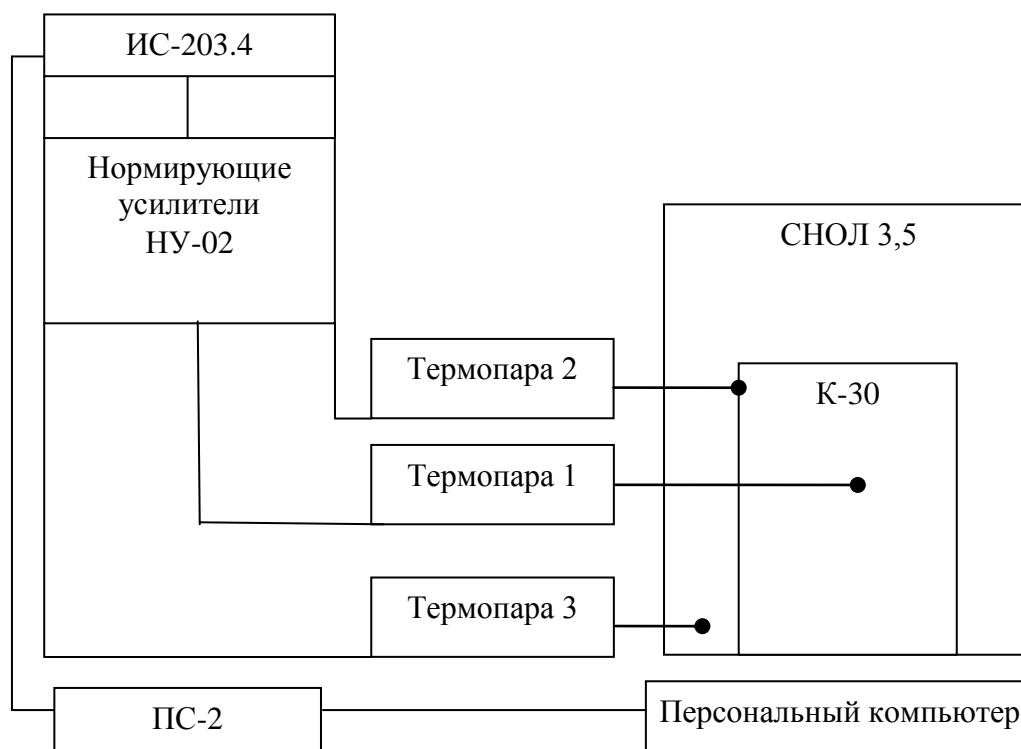


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Эксперимент проводился при двух критических температурах воздуха в сушильном шкафу: 210, 175 °С. Критическими приняты температуры воздуха выше 100 °С.

При анализе графиков (рисунок 2) видно, что после пересечения кривых 1 и 2, характеризующих температуры в центре и на поверхности испытуемого материала соответственно, температура теплофизического центра контейнера (кривая 1) стала превышать теплоотвод от поверхности контейнера (кривая 2).

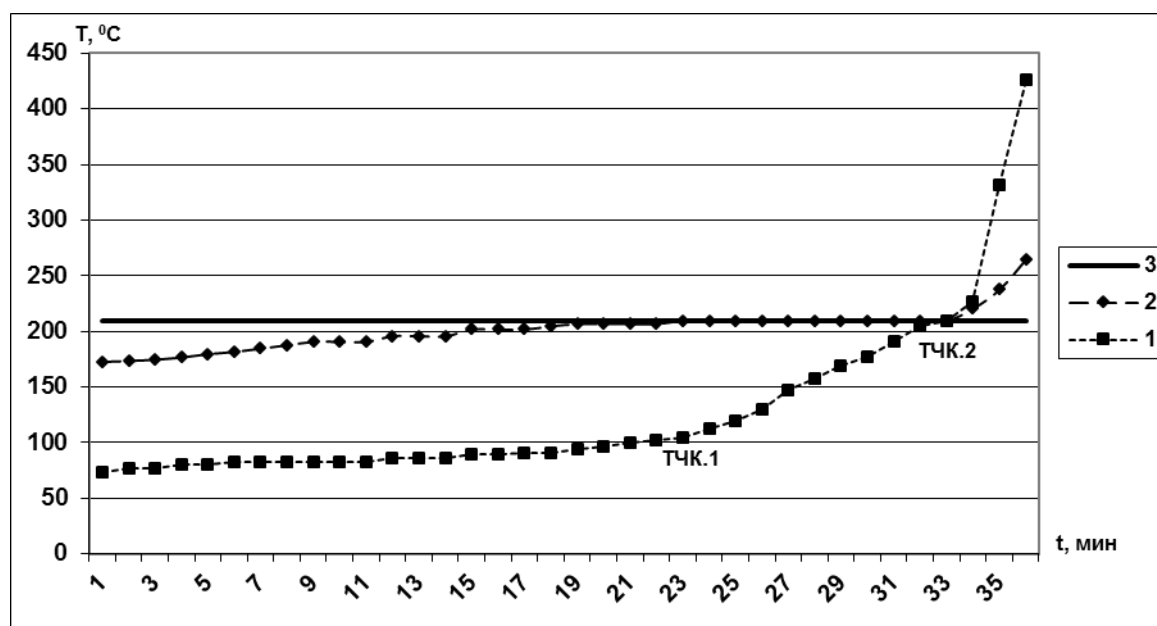


Рисунок 2 – Самовозгорание образца торфа. Температура воздуха 210 °С. Значение температуры в точке 1 – 105 °С и точке 2 – 210 °С. Влажность образца на начало измерений  $W_{H12} = 12,3 \%$ , объемная плотность почвы  $d_V = 0,13 \text{ г/см}^3$ . Время до самовозгорания 36 мин

При анализе кривых изменения температуры поверхности контейнера видно, что температурная кривая поверхности контейнера до точки пересечения с температурной кривой воздуха в сушильном шкафу и температурной кривой теплофизического центра изменяется по одному и тому же линейному закону.

Кривую, характеризующую температуру теплофизического центра контейнера, можно разделить на три участка: первый участок – с момента начала эксперимента до достижения значения в центре контейнера температуры, равной половине температуры воздуха; второй – до момента пересечения с температурной кривой поверхности контейнера и температурой воздуха в сушильном шкафу; третий – до момента самовозгорания.

Первый участок изменяется по одному закону, близкому к линейному, а второй участок по другому закону, также почти линейному. Третий участок характеризуется резким ускорением процесса нагрева торфа, как в центре образца, так и на поверхности. Причем на третьем участке температура теплофизического центра и поверхности материала значительно превышают температуру воздуха в сушильном шкафу.

Данный эффект связан с химической реакцией окисления материала, которая является самоускоряющейся и развивается с большой скоростью после достижения определенной температуры активации теплофизического центра и поверхности образцов торфа. Этот процесс невозможно математически смоделировать из-за его большой скорости и зависимости от содержания окислителя в образцах торфа, которое в каждом эксперименте может быть разным, и которое невозможно учесть.

Изменения характера температурной кривой теплофизического центра образцов на первом и втором участках связано с изменением содержания влаги в испытуемых образцах на данный момент времени. Были выделены две характерные точки: точка 1 при температуре 105 °С, которая наблюдалась на графике (рисунок 2); точка 2 при пересечении температурных кривых поверхности и центра образца торфа в контейнере при температуре воздуха в сушильном шкафу 210 °С.

В точке 1 влажность образцов торфа составляла 0 %, то есть образцы находились в абсолютно сухом состоянии. Таким образом, участок температурной кривой теплофизического центра от точки 1 до точки 2 нагревался без участия влаги по более крутой траектории, и соответственно по другому закону, чем участок от начала эксперимента до точки 1. На участке до точки 1 в образце торфа присутствовала влага, которая, испаряясь, способствовала замедлению процесса разогрева теплофизического центра. Также установлено, что с увеличением плотности образцов торфа увеличивалось время до их самовозгорания, что объясняется тем, что в более плотных навесках торфа содержалось больше влаги, которая, испаряясь, замедляла процесс разогрева. Увеличение времени до самовозгорания торфа с ростом его плотности на участке от точки 1 до конца эксперимента объясняется тем, что в более плотных образцах содержится меньше кислорода, который является окислителем в процессе самовозгорания.

Также проведены экспериментальные исследования с использованием

вышеприведенной методики аналогичных образцов торфа при температуре 90 °С, температура ниже критической.

Первый участок (рисунок 3) заключен между началом кривой 1 и характерной точкой 1. Температура в точке 1 равна половине температуры воздуха в сушильном шкафу, и в нашем случае составляет 45 °С. В точке 1 определялась влажность образцов торфа, которая составила 52,9 % от массы абсолютно сухой почвы при плотности образца  $d_V = 0,16 \text{ г/см}^3$ .

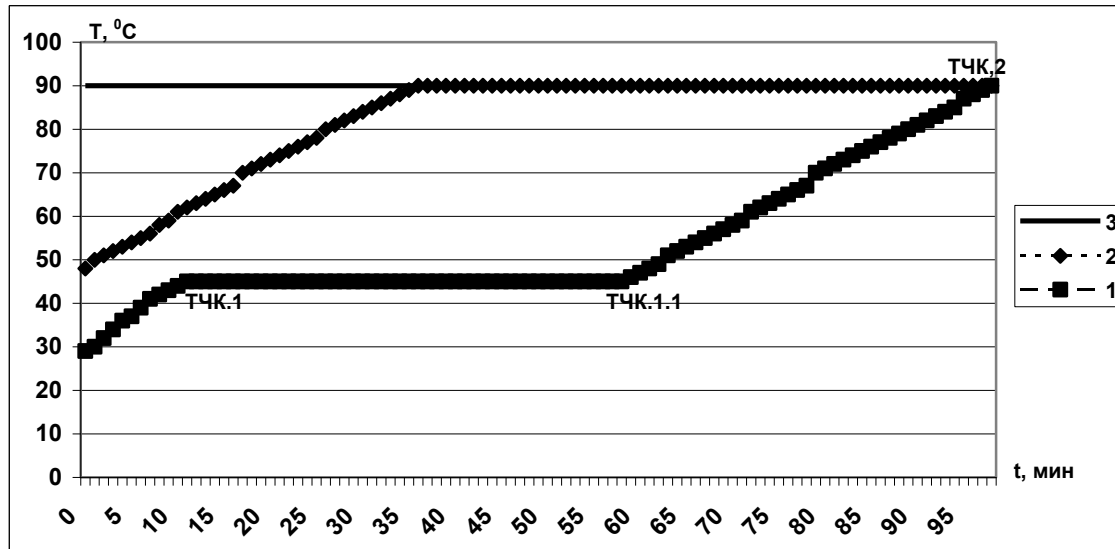


Рисунок 3 – Самовозгорание образца торфа. Температура воздуха 90 °С. Значение температуры в точке 1 – 45 °С, точке 1.1 – 45 °С и точке 2 – 90 °С. Влажность образца на начало измерений  $W_{H12} = 65,2 \%$ , объемная плотность почвы  $d_V = 0,16 \text{ г/см}^3$

Второй участок, расположенный между точками 1 и 1.1 на кривой 1, представляет собой прямолинейный участок, характеризующийся температурой равной половине температуры воздуха в сушильном шкафу, то есть 45 °С. В точке 1.1 определена влажность образцов, которая составила 0 %.

Третий участок расположен между точками 1.1 и 2. Данный участок характеризуется дальнейшим повышением температуры теплофизического центра образцов торфа при их влажности 0 % до достижения критической точки 2 с температурой 90 °С, равной температуре воздуха в сушильном шкафу.

Температурная кривая 2 поверхности образцов торфа характеризуется двумя участками. Первый участок – это наклонная линия от начала эксперимента до достижения значения 45 °С, и второй участок – это прямолинейная линия в продолжение первого участка с температурой 45 °С до критической точки 2 (рисунок 3).

Таким образом, по полученным результатам экспериментов при температуре 90 °С ниже критических, можно сделать заключение, что наличие влажности в образцах торфа не дает расти температуре теплофизического центра выше значения, равного половине статлируемой температуры воздуха. Как только торф полностью обезвоживается, начинается рост температуры теплофизического центра.

Разработанная на основе проведенных экспериментальных исследований

математическая модель оценивает теплофизические процессы возникновения самовозгорания торфа по следующим критериям: влажность; температура поверхности и теплофизического центра расчетного слоя торфа; температура окружающей среды.

Из результатов экспериментальных исследований следует, что процесс самовозгорания проходит по-разному при температурах окружающего воздуха выше критических (более 100 °С) и ниже критических (менее 100 °С). Рассмотрим модель самовозгорания торфяной почвы при температурах воздуха выше критических.

Согласно результатам экспериментальных исследований процесс самовозгорания можно описать тремя уравнениями: первое описывает процесс нагрева поверхности торфа до температуры воздуха окружающей среды; второе моделирует процесс нагрева теплофизического центра торфяной почвы до характерной точки 1; третье моделирует изменение температуры теплофизического центра до критической точки 2.

Рассмотрим первое уравнение для описания процесса нагрева поверхности торфяной почвы до температуры воздуха в сушильном шкафу. В общем виде уравнение представляет собой:

$$T_{\Pi} = T_{\Pi}^H + \Delta T_{\Pi}, \quad (1)$$

где  $T_{\Pi}$  – температура поверхности торфа на интересующий момент времени, °С;  $T_{\Pi}^H$  – начальная температура поверхности торфа, которая задается или определяется экспериментальным путем, °С;  $\Delta T_{\Pi}$  – приращение температуры поверхности торфа за определенный интервал времени, °С.

Фактически  $\Delta T_{\Pi}$  есть функция параметров, которые определены в результате проведения экспериментальных исследований:

$$\Delta T_{\Pi} = f(\Delta\tau_{\Pi}, d_V, F, V, T_{\text{ОКР}}), \quad (2)$$

где  $\Delta\tau_{\Pi}$  – интервал времени до нагрева поверхности торфа до температуры воздуха окружающей среды, мин;  $d_V$  – объемная или насыпная плотность торфа, г/см<sup>3</sup>;  $F$  – площадь поверхности торфа, контактирующая с окружающим воздухом, см<sup>2</sup>;  $V$  – объем торфа, подвергающийся тепловому воздействию, см<sup>3</sup>;  $T_{\text{ОКР}}$  – температура окружающего воздуха, °С.

Эмпирическим путем получено:

$$T_{\Pi} = T_{\Pi}^H + \Delta\tau_{\Pi} \left( d_V \frac{F}{V} T_{\text{ОКР}} \right)^{1/F}. \quad (3)$$

Данное уравнение является зависимостью линейного типа. Следует отметить, что соотношение  $\frac{F}{V}$  характеризует размер и скопление торфяной почвы.

Преобразуем уравнение (3) и выразим из него  $\Delta\tau_{\Pi}$ :

$$\Delta\tau_{\Pi} = \frac{T_{\Pi} - T_{\Pi}^H}{\left( d_V \frac{F}{V} T_{\text{ОКР}} \right)^{1/F}}. \quad (4)$$

Выполнен расчет интервала времени по уравнению (4) и сравнение полу-

ченных результатов с результатами экспериментальных исследований (таблица 1). Из таблицы 1 видно, что уравнение (4) позволяет производить расчеты с достаточной степенью точности, и использовать его для прогноза возникновения процесса самовозгорания торфяной почвы.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований и математического моделирования времени достижения поверхностью торфяной почвы температуры  $T_{\text{ОКР}}$  при температурах выше критических

Объемная плотность торфа $d_V$ , г/см <sup>3</sup>	Температура воздуха в сушильном шкафу $T_{\text{ОКР}}$ , °С	$\Delta\tau_{\text{П}}$ , полученное опытным путем, мин	$\Delta\tau_{\text{П}}$ , полученное расчетным путем, мин	Температура поверхности торфа $T_{\text{П}}$ , °С	Расхождение расчетных и опытных значений $\Delta\tau_{\text{П}}$ , %
0,13	210	24,5	26,1	210	6,5
0,14	210	25	26,8	210	7,2
0,18	210	33	35	210	6,1
0,16	175	40	42,4	175	6
0,17	175	44	42	175	4,6
0,21	175	50	47,8	175	4,4

Второе уравнение моделирует теплофизический процесс нагрева центра исследуемого торфяного слоя до характерной точки 1. В общем виде уравнение записывается:

$$T_{\text{Ц1}} = T_{\text{ЦН1}} + \Delta T_{\text{Ц1}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{Ц1}}$  – температура теплофизического центра торфяного слоя в точке 1, °С;  $T_{\text{ЦН1}}$  – начальная температура теплофизического центра торфяного слоя задавалась по результатам экспериментальных исследований, °С;  $\Delta T_{\text{Ц1}}$  – приращение температуры теплофизического центра торфяного слоя за интервал времени, °С.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что  $\Delta T_{\text{Ц1}}$  зависит от параметров:

$$\Delta T_{\text{Ц1}} = f(\Delta\tau_1, d_V, F, V, T_{\text{ОКР}}, U), \quad (6)$$

где  $\Delta\tau_1$  – временной интервал достижения температуры теплофизического центра торфяного слоя почвы характерной точки 1, мин;  $U$  – интенсивность потери влаги из образца, г/мин.

Таким образом, изменение температуры в теплофизическом центре торфяной почвы зависело не только от  $\Delta\tau_1, d_V, F, V, T_{\text{ОКР}}$ , но и влажности образца, которая изменялась с течением времени.

Изменение влажности образца учитывалось через интенсивность испарения влаги  $U$  из него, которая зависела от плотности образца, статированной температуры в сушильном шкафу и начальной влажности торфяной почвы. Запишем уравнение (5) с учетом вышесказанного:

$$T_{\text{Ц1}} = T_{\text{ЦН1}} + \Delta\tau_1 \left( d_V \frac{F}{V} T_{\text{ОКР}} \right)^{UF}. \quad (7)$$

Учитывая, что температура в центре теплофизического центра торфяной почвы в точке 1 равна половине температуры, статируемой в сушильном шкафу, то есть выполняется условие  $T_{Ц1} = \frac{1}{2}T_{ОКР}$ , уравнение (7) можно записать в следующем виде, выразив из него  $\Delta\tau_1$ :

$$\Delta\tau_1 = \frac{\frac{1}{2}T_{ОКР} - T_{ЦН1}}{\left(d_V \frac{F}{V} T_{ОКР}\right)^{UF}}. \quad (8)$$

По уравнению (8) выполнен расчет, а его результаты сравнены с результатами экспериментальных исследований (таблица 2).

Таблица 2 – Оценка достоверности результатов математического моделирования и экспериментальных исследований времени достижения теплофизическим центром торфяного слоя температуры характерной для точки 1 при температурах выше критических

Объемная плотность торфа $d_V$ , г/см <sup>3</sup>	Температура воздуха в сушильном шкафу $T_{ОКР}$ , °С	$\Delta\tau_1$ , полученное опытным путем, мин	$\Delta\tau_1$ , полученное расчетным путем, мин	Температура $T_{Ц1}$ , °С	$U$ , г/мин	Расхождение расчетных и опытных значений $\Delta\tau_1$ , %
0,13	210	23	24,5	105	0,015	6,5
0,14	210	25	23,1	105	0,02	7,6
0,18	210	29	27,1	105	0,033	6,6
0,16	175	26	24,4	87,5	0,016	6,2
0,17	175	31	30	87,5	0,017	3,3
0,21	175	39	36,9	87,5	0,023	5,4

Из анализа таблицы 2 видно, что расчет по уравнению (8) достаточно точен, максимальный процент расхождения между расчетными и экспериментальными данными составляет 7,6 %.

Рассмотрим третье уравнение, моделирующее процесс изменения температуры теплофизического центра от характерной точки 1 до критической точки 2 при температурах выше критических:

$$T_{Ц2} = T_{ЦН2} + \Delta T_{Ц2}, \quad (9)$$

где  $T_{Ц2}$  – температура теплофизического центра торфяного слоя в точке 2, численно равная  $T_{ОКР}$ , °С;  $T_{ЦН2}$  – начальная температура теплофизического центра торфяного слоя для расчета точки 2, численно равная  $1/2T_{ОКР}$ , °С;  $\Delta T_{Ц2}$  – приращение температуры теплофизического центра торфяного слоя за интервал времени, °С.

При разогреве теплофизического центра торфяного слоя на температурном участке от точки 1 до точки 2 преобладают процессы самонагрева материала, которые носят окислительный химический характер. Влажность материала на рассматриваемом участке равна 0 %, и, таким образом, она не участвует в процессе самонагрева как в предыдущем уравнении.

С учетом вышесказанного для расчета  $\Delta T_{Ц2}$  предложено уравнение:



$$\Delta T_{Ц2} = \Delta\tau_2 \left( d_V \frac{F}{V} T_{ОКР} \right)^m, \quad (10)$$

где  $\Delta\tau_2$  – временной интервал теплофизического центра слоя торфяной почвы между точками 1 и 2, мин;  $m$  – масса абсолютно сухой торфяной почвы или масса реагирующего вещества, г;  $\delta_{*\infty}$  – критерий Франка-Каменецкого при критических условиях самовозгорания.

Преобразуем уравнение (10), выразив  $\Delta\tau_2$  с учетом равенства  $\Delta T_{Ц2} = T_{ОКР} - \frac{1}{2}T_{ОКР}$ :

$$\Delta\tau_2 = \frac{T_{ОКР} - \frac{1}{2}T_{ОКР}}{\left( d_V \frac{F}{V} T_{ОКР} \right)^m \delta_{*\infty}}. \quad (11)$$

По уравнению (11) выполнен расчет  $\Delta\tau_2$ , результаты которого приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Оценка достоверности результатов моделирования температуры теплофизического центра торфяного слоя до критической точки 2

Объемная плотность торфа $d_V$ , г/см <sup>3</sup>	Температура воздуха в сушильном шкафу $T_{ОКР}$ , °С	$\Delta\tau_2$ , полученные опытным путем, минуты	$\Delta\tau_2$ , полученные расчетным путем, минуты	$\delta_{*\infty}$	$m$ , г	Расхождение расчетных и опытных значений $\Delta\tau_2$ , %
0,13	210	10,5	11,2	2,86	2,82	6,7
0,14	210	11	11,7	2,86	2,98	6,4
0,18	210	17	15,8	2,86	3,83	7,1
0,16	175	14	13,4	2,86	3,41	4,3
0,17	175	15	14,3	2,86	3,62	5
0,21	175	19	17,6	2,86	4,47	7,4

Из сравнения экспериментальных и расчетных данных по  $\Delta\tau_2$ , приведенных в таблице 3, видно, что расхождение между ними находится в допустимых пределах.

Из приведенных трех уравнений для определения времени достижения критической точки 2 расчетными являются (8) и (11). Уравнение (4) является дополнительным и показывает, что температура поверхности торфяной почвы достигает температуры окружающей среды задолго до возникновения условий для самовозгорания критической точки 2. Таким образом, конечная точность расчета общего времени до возникновения критических условий для самовозгорания торфяной почвы  $\Delta\tau = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2$  определяется уравнениями (8) и (11), которая приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Погрешность результатов расчета по уравнениям (8) и (11)

Объемная плотность торфа $d_V$ , г/см <sup>3</sup>	Температура воздуха в сушильном шкафу $T_{\text{ОКР}}$ , °С	Расхождение расчетных и опытных значений $\Delta\tau$ , %
0,13	210	13,2
0,14	210	14
0,18	210	13,7
0,16	175	10,5
0,17	175	8,3
0,21	175	12,5

Согласно результатам экспериментальных исследований процесс самовозгорания при температурах ниже критических можно описать системой из четырех уравнений: первое описывает процесс нагрева поверхности торфа до температуры воздуха окружающей среды и является общим для расчета при критических температурах и температурах ниже критических, уравнение (4); второе (8) моделирует процесс нагрева теплофизического центра торфяной почвы до характерной точки 1, и также является общим для всех рассматриваемых температур воздуха окружающей среды; третье моделирует временной интервал теплофизического центра на входе в точку 1 и выходе из точки 1.1; четвертое моделирует процесс нагрева теплофизического центра торфяной почвы на выходе из точки 1.1 до точки 2.

Рассмотрим третье уравнение, моделирующее временной интервал прямолинейного участка температуры теплофизического центра торфяной почвы при значении  $1/2 \cdot T_{\text{ОКР}}$  между характерными точками 1 и 1.1. Данный участок характеризуется тем, что в конечной точке 1.1 участка влажность слоя торфяной почвы равняется 0 %. Уравнение представлено в виде:

$$\Delta\tau_{1.1} = \frac{m_{\text{ВН}} - \Delta\tau_1 U}{U}, \quad (12)$$

где  $\Delta\tau_{1.1}$  – интервал времени между характерной точкой 1 и точкой 1.1, мин;  $m_{\text{ВН}}$  – стартовая или начальная масса воды в образце торфяной почвы, г.

В таблице 5 приведены результаты расчета по уравнению (12) и экспериментальных исследований, из которых видно, что данное уравнение пригодно для проведения прогнозных расчетов, причем в уравнение подставлялись значения  $\Delta\tau_1$ , полученные расчетным путем. Таким образом, можно считать, что приведенная погрешность вычислений в таблице 5 является суммарной для уравнений (8) и (12).

Таблица 5 – Оценка достоверности результатов моделирования и экспериментальных исследований  $\Delta\tau_{1.1}$  при температурах воздуха окружающей среды ниже критических

Объемная плотность торфа $d_V$ , г/см <sup>3</sup>	Температура воздуха в сушильном шкафу $T_{\text{ОКР}}$ , °С	$\Delta\tau_{1.1}$ , полученные опытным путем, мин	$\Delta\tau_{1.1}$ , полученные расчетным путем, мин	$m_{\text{ВН}}$ , г	$U$ , г/мин	Расхождение расчетных и опытных значений $\Delta\tau_{1.1}$ , %
0,16	90	47	46,5	2,22	0,039	1,1
0,18	90	102	102,2	2,54	0,021	0,2

Четвертое уравнение, моделирующие процесс изменения температуры теплофизического центра от характерной точки 1.1 до критической точки 2 при температурах ниже критических, которое аналогично уравнению (11). Критерий Франка-Каменецкого  $\delta_{*\infty}$  брался для некритических условий по Мержанову для неограниченного цилиндра.

Результаты представлены в таблице 6, из которых можно сделать вывод, что уравнение (11) пригодно для проведения прогнозных расчетов.

Таблица 6 – Оценка достоверности результатов моделирования времени достижения температуры теплофизическим центром торфяного слоя от точки 1.1 до точки 2 при температурах ниже критических

Объемная плотность торфа $d_V$ , г/см <sup>3</sup>	Температура воздуха в сушильном шкафу $T_{\text{ОКР}}$ , °С	$\Delta\tau_2$ , полученные опытным путем, мин	$\Delta\tau_2$ , полученные расчетным путем, мин	$\delta_{*\infty}$ для некритических условий	$m$ , г	Расхождение расчетных и опытных значений $\Delta\tau_2$ , %
0,16	90	40	37,8	0,38	3,41	5,5
0,18	90	41	38	0,38	3,83	7,3

#### **Глава 4. Результаты полевых исследований. Доработка математической модели самовозгорания торфяной почвы**

Экспериментальные исследования проводились на осушенном болоте «Кальское», расположенном в Рязанском районе Рязанской области. Площадь объекта составляет 309 га. Водное питание – грунтовое. Почва торфяная низинная, глубина торфа составляет от 0,8 до 1,5 м. Коэффициент фильтрации 1,04...1,14 м/сут. Степень разложения торфа составляет 45...53 %, зольность 22...28 %, рН солевой вытяжки 5,5...6,0. Осушается объект глубокими редкими каналами, врезанными дном в песок. Расстояние между собирателями 300 м, ловчими – 500 м.

Глубина грунтовых вод в зависимости от метеорологических условий колеблется в среднем за вегетацию от 1,2...1,5 м от поверхности. Используется мелиоративный объект «Кальское» в системе овощекормового севооборота.

Целью исследований являлось изучение режимов влажности и температуры поверхности и внутренних слоев торфяной почвы на осушенном поле, используемом под многолетние травы, и на естественном болоте. Опытные площадки заложены в трех вариантах: на осушенном торфянике, который используется под многолетние травы, квадратная площадка площадью 1 м<sup>2</sup>, очищенная от растительности; на осушенном торфянике измерения проводились рядом с первым вариантом непосредственно на площади занятой многолетними травами; на болотном массиве с естественной растительностью.

В летний период времени на опытных площадках производились измерения: температуры воздуха над поверхностью почвы, поверхности почвы 0 см, в центре слоя торфяной почвы 0...5 см, в центре слоя торфяной почвы 5...10 см, в центре слоя торфяной почвы 10...15 см; влажности: поверхности торфяной почвы, в слое торфяной почвы 0...5 см, слое торфяной почвы 5...10 см и слое торфяной почвы 10...15 см. Также на поле и на естественном болотном массиве

велись наблюдения за уровнем грунтовых вод (рисунок 5).

На рисунке 4 представлены результаты измерений температуры в центре слоёв торфяной почвы, из которых видно, что за период наблюдений, создавались предпосылки возникновения торфяного пожара в верхнем слое 0...5 см, когда температура теплофизического центра превышала температуру поверхности или они были равны.

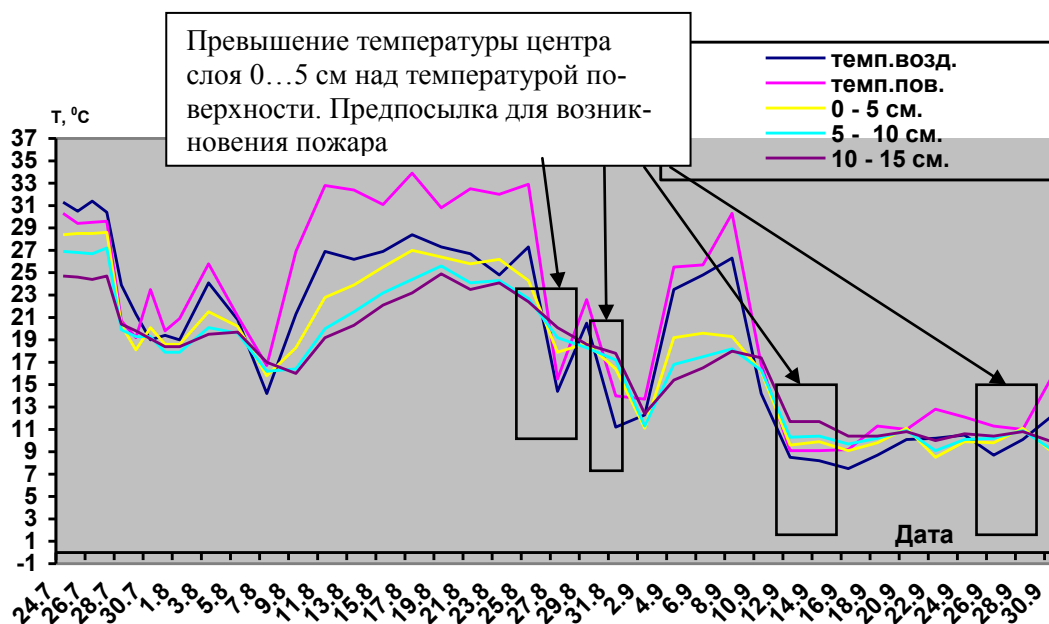


Рисунок 4 – Температурный режим торфяной почвы во время проведения полевых исследований

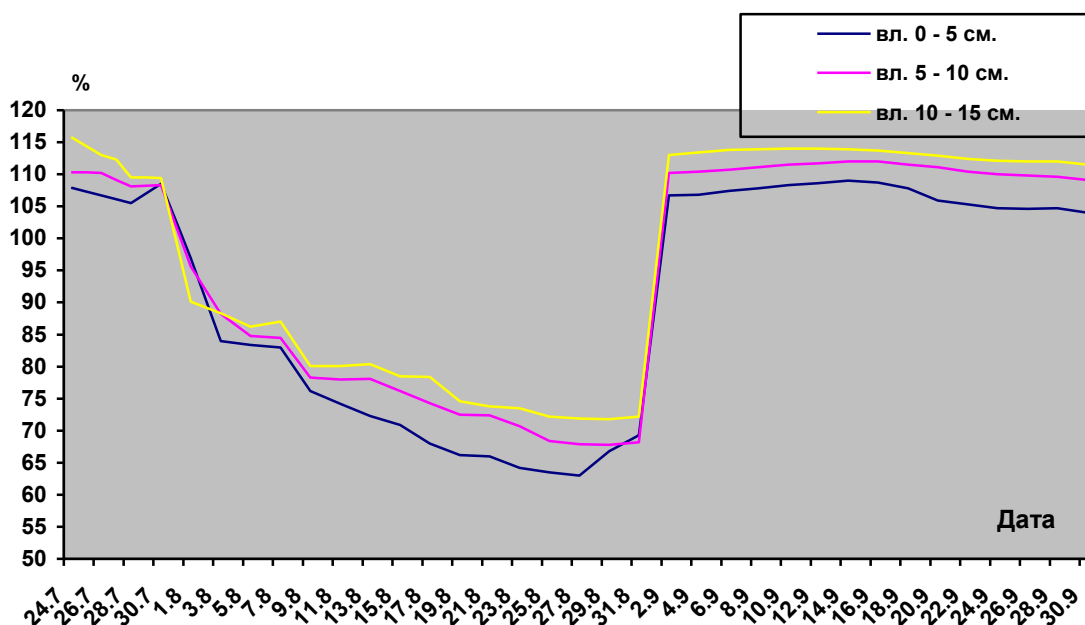


Рисунок 5 – Влажность торфяной почвы в % от абсолютно сухой массы

Следует отметить, что предпосылка возникновения торфяного пожара в период проведения исследований возникла в слое 0...5 см в режиме вынужденного зажигания от нагретых тел, таких как коллекторы выхлопных систем машин и механизмов.

По результатам экспериментальных исследований рассчитана энергия активации исследуемого торфа, которая составила  $E = 120$  кДж/моль. По литературным данным энергия активации торфа изменяется в пределах 70...170 кДж/моль.

Самовозгорание торфяной почвы не возникло по причине того, что энергия активации была ниже необходимых значений из-за высокой влажности почвы (рисунок 5) и уровня грунтовых вод (рисунок 6), который обеспечивал капиллярное подпитывание.

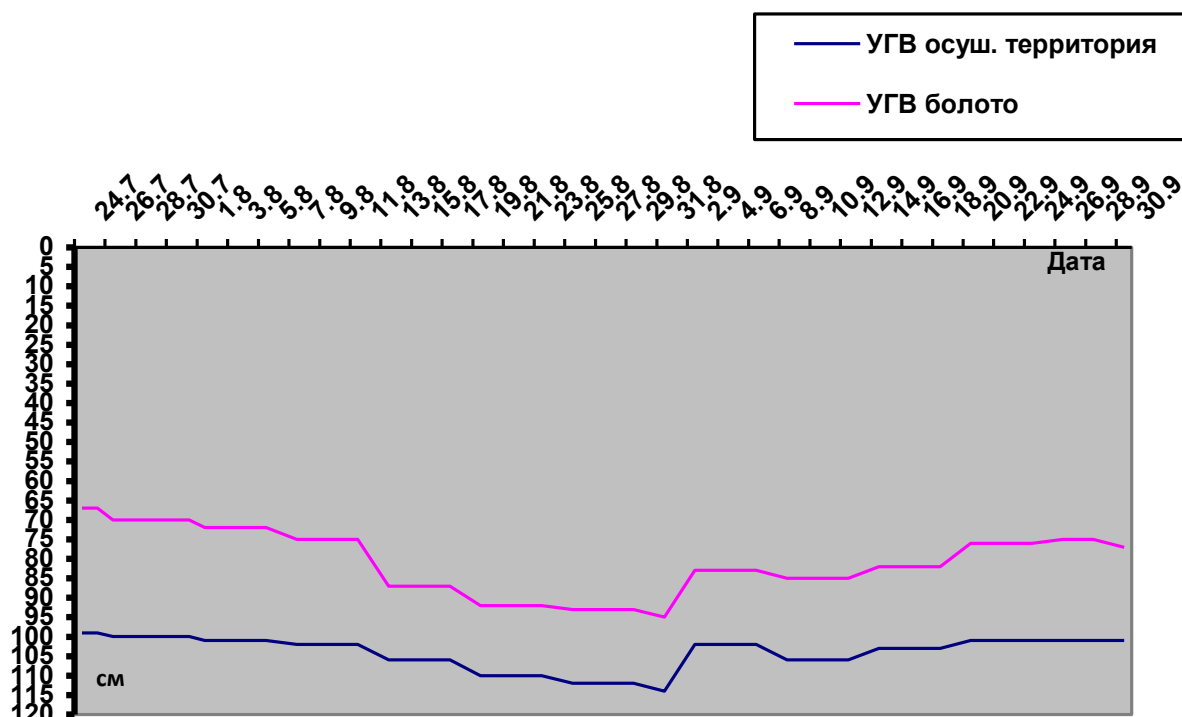


Рисунок 6 – Уровень грунтовых вод на осушенной территории и болоте, см

Исходя из того, что при подпитывании грунтовыми водами слоя 0...5 см торфяника только 2 % энергии идет на нагрев поверхности и слоя почвы, в уравнение (3) для указанных условий введем коэффициент 0,02 и запишем в виде:

$$T_{\Pi} = T_{\Pi}^H + \Delta\tau_{\Pi} \left( d_V \frac{F}{V} T_{\text{ОКР}} \right)^{1/F} 0,02. \quad (13)$$

Расчеты по уравнению (13) и их сравнение с экспериментальными данными приведены на рисунке 7. Из сравнения графиков видно, что кривые экспериментальных и расчетных данных совпадают по своему алгоритму. Максимальное расхождение между ними составило 15,6 %, минимальное – 2,2 %, а среднее – 8,7 %.

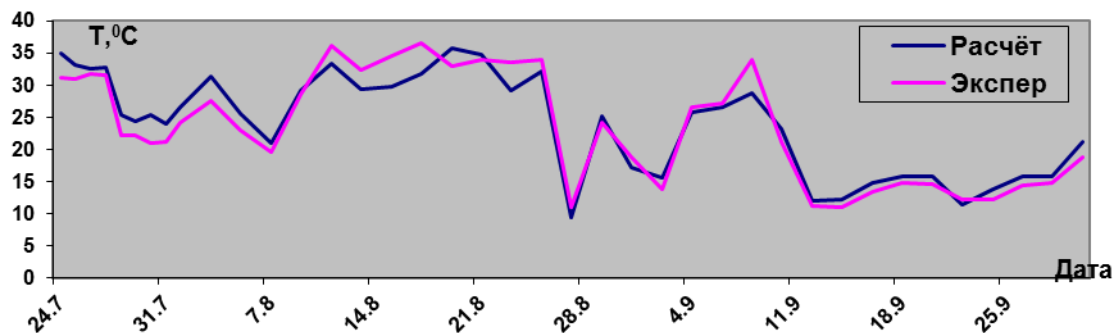


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных температуры поверхности слоя осушенной торфяной почвы

Для расчета температуры теплофизического центра торфяной почвы в слое 0...5 см в зависимость (8) также введем коэффициент 0,02. При проведении экспериментальных полевых исследований, в отличие от лабораторных, слой торфяной почвы подпитывались грунтовыми водами и атмосферными осадками, поэтому не будем учитывать интенсивность испарения влаги. С учетом изменений оно примет вид:

$$T_{Ц1} = T_{ЦН1} + \Delta\tau_1 \left( d_V \frac{F}{V} T_{ОКР} \right) 0,02. \quad (14)$$

Результаты расчета по зависимости (14) и их сравнение с экспериментальными полевыми исследованиями приведены на рисунке 8.

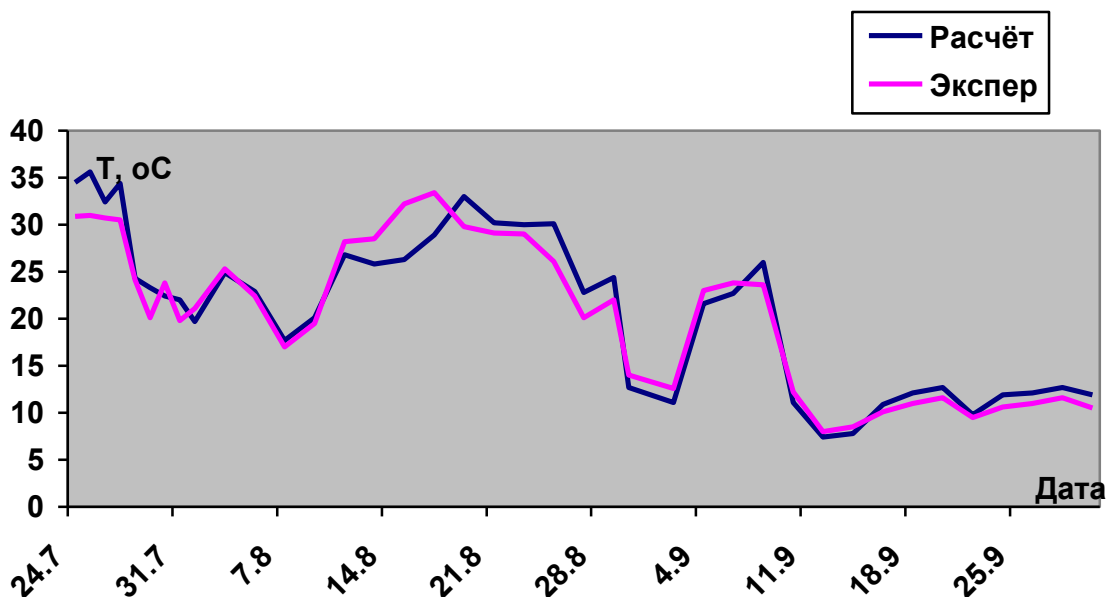


Рисунок 8 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных температуры центра слоя 0...5 см осушенной торфяной почвы

Из сравнения графиков видно, что алгоритм кривых расчетных данных и моделирования совпадают. Максимальное расхождение между ними составило 18,3 %, минимальное – 1,6 %, а среднее – 9,2 %.

## Глава 5. Состав мероприятий по предотвращению торфяных пожаров

В основном в России используется черная культура освоения торфяников под овощекормовые севообороты, которая создает предпосылки для возгорания торфяной почвы за счет ее открытости для воздействия солнечной радиации в условиях низкого расположения грунтовых вод и, как результат, разрыв капиллярной каймы с верхними слоями почвы.

В период вегетации сельскохозяйственных культур торфяные почвы высыхают до пожароопасного состояния. Не только из-за отсутствия осадков высыханию способствует возделываемые культуры, которые работают как испаритель воды за счет высокой транспирации или испарительной способности.

Применение специальных обработок с использованием комплекса машин в условиях черной культуры освоения, при котором происходит изменение водно-физических свойств слоя торфа, препятствует возникновению пожара. На рисунке 9 приведены результаты моделирования изменения плотности торфяной почвы и времени достижения пожарной опасности при различных значениях, из анализа которых следует, что время до достижения пожарной опасности верхнего слоя торфа увеличивается с возрастанием его объемной плотности. Таким образом, если увеличить плотность верхнего торфяного слоя до максимальных значений, то пожароопасный период сдвигается до 8 месяцев, тогда как в средней полосе его длительность составляет 4 месяца (с апреля по август), то есть возникновение торфяных пожаров на торфяниках становится невозможным.

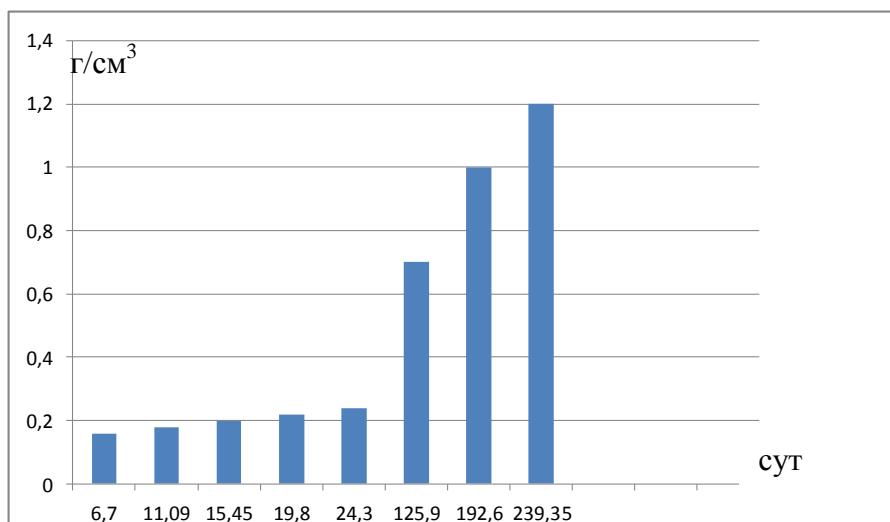


Рисунок 9 – Время достижения условий самовозгорания и вынужденного зажигания торфа в зависимости от плотности сложения по результатам математического моделирования

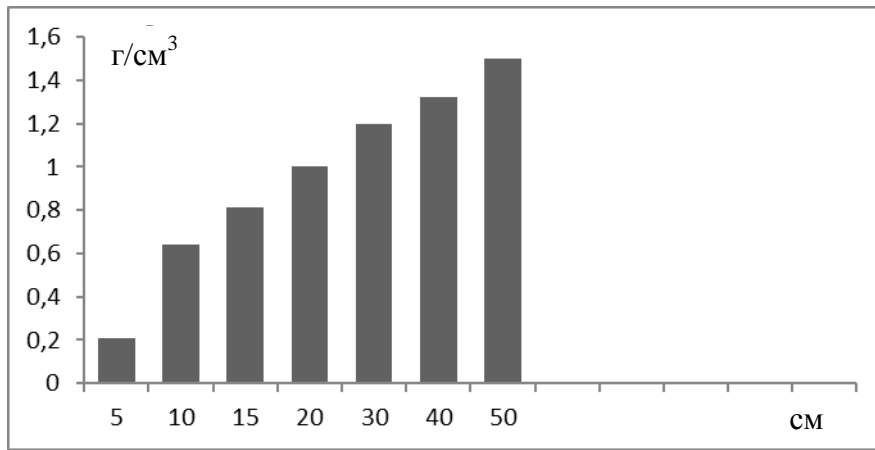


Рисунок 10 – Изменение плотности торфяной почвы до проведения технического этапа рекультивации

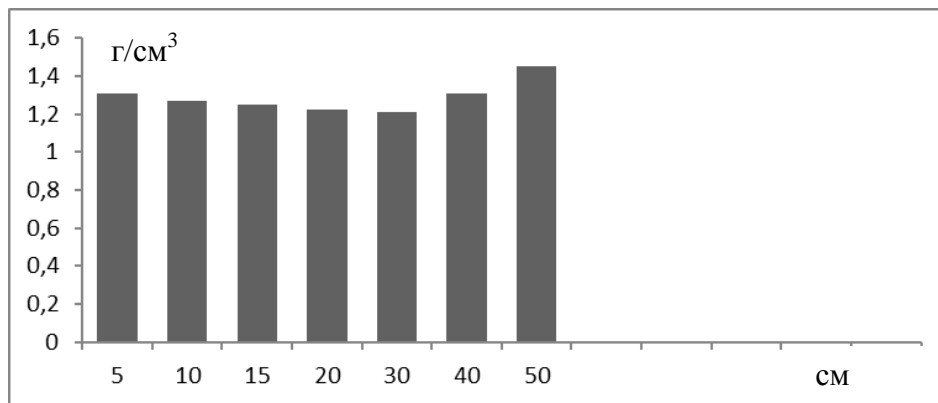


Рисунок 11 – Плотность торфяной почвы по глубине после проведения технического этапа рекультивации

На рисунках 10, 11, 12, 13 представлены результаты замеров плотности, абсолютной влажности торфяной почвы до проведения технического этапа рекультивации по слоям и после, из которого можно сделать заключение о невозможности возникновения торфяного пожара после проведения рекультивационных работ.

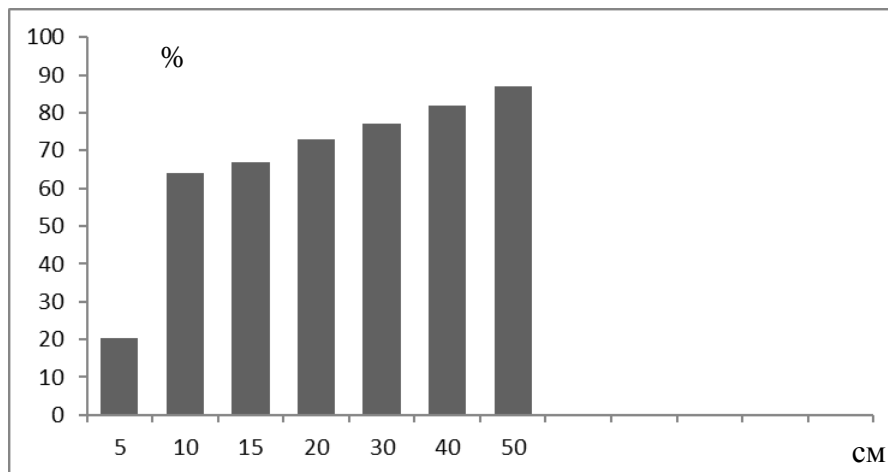


Рисунок 12 – Изменение влажности слоя торфяной почвы по глубине до проведения технического этапа рекультивации



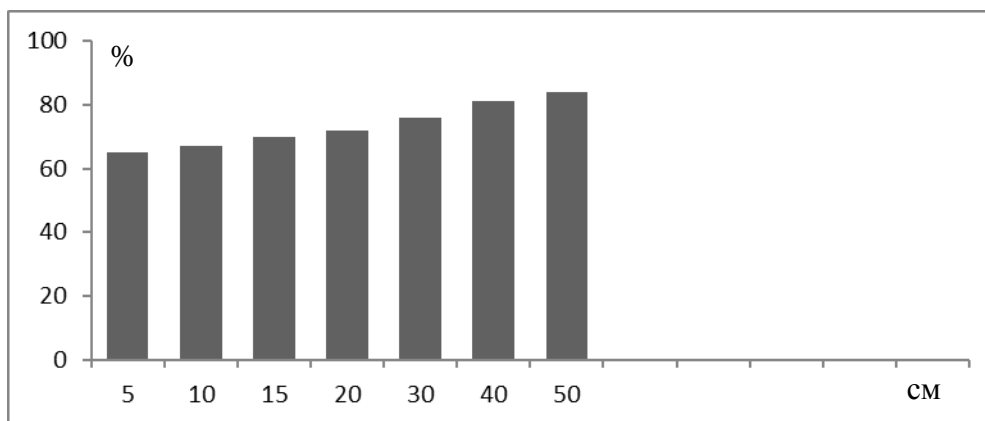


Рисунок 13 – Послойная влажность слоя торфяной почвы после проведения технического этапа рекультивации

На основе проведенных исследований предложен комплекс технологических операций по изменению теплофизических свойств торфяной почвы.

Технологические операции по изменению объемной плотности торфяного слоя с применением комплекса машин приведены на рисунке 14.

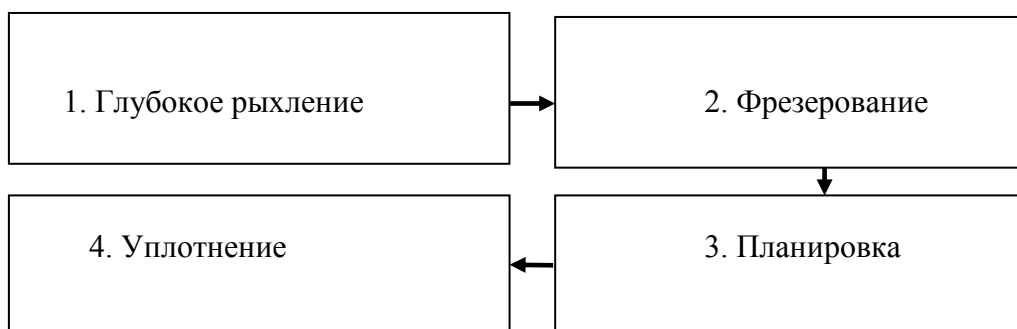


Рисунок 14 – Технологические операции

Назначение технологических операций: 1 – глубокая вспашка торфяника на 60...70 см с целью рыхления уплотненной части подстилающего грунта, которая по нашим данным составляет 10 см и препятствует поступлению влаги в верхние слои за счет капиллярного питания от грунтовых вод для создания капиллярных связей со слоем торфа; 2 – фрезерование поверхности торфяного участка на глубину 15...20 см для перемешивания верхнего пожароопасного 5 см слоя с более плотными низлежащими слоями с целью создания более плотного слоя; 3 – планировка поверхности для повышения эффективности последующего прикатывания торфяного слоя с целью увеличения его плотности (данная операция позволяет снизить испарение с поверхности поля до 20 % в теплый период за счет уменьшения площади контакта поля с атмосферным воздухом); 4 – уплотнение фрезерованного слоя торфа для уменьшения его пожарной опасности, пригодности под биологический (сельскохозяйственный) этап рекультивации и создание капиллярной связи с низлежащими слоями.

Для выполнения указанных выше технологических мероприятий применялся трактор К707Т 5-го класса производства завода «Балтиец».

Удельное давление на почву составляет 0,08 МПа или 0,8 кг/см<sup>2</sup>. Уплотнение движителя по следу в процессе выполнения технологических операций

не учитывалось, поскольку целью технического этапа рекультивации было уплотнение верхнего слоя торфа и финальная обработка производилась водоналивными катками с давлением  $6,1 \text{ кг/см}^2$ , что значительно превышает уплотняющие действие применяемого движителя.

Первой технологической операцией на рекультивируемом участке выработанного торфяника площадью 10 га, расположенного в Рязанской области, являлось глубокое рыхление. Операция выполнялась плоскорезом Муромец-4. Глубина обработки составила 60 см, то есть подстилающий песчаный слой обработан на глубину 10 см для создания устойчивой капиллярной связи с торфяным слоем.

Глубина фрезерования составила 20 см. Плотность слоя торфа после прохождения фрезы в указанном слое составила  $0,68 \text{ г/см}^3$ .

Для проведения данного этапа использовалась фреза усиленная ФРН-2К, предназначенная для выполнения сельскохозяйственных работ по обработке почвы, как поверхностной, так и глубокой, на глубину до 28 см.

После фрезерования поверхности торфяника выполнена планировка поверхности с целью уменьшения испарения влаги с поверхности и повышения качества и производительности по его уплотнению. Для этих целей применялся прицепной грейдер СД-105А.

Плотность почвы влажностью выше 20...22 % от абсолютно сухой массы после применения катков заметно возрастает. При уменьшении влажности почвы уплотняющее действие катка резко снижается.

Для уплотнения поверхности торфяника использовался каток КВНП-14 (давление  $6,11 \text{ кг/см}^2$ ). Влажность торфа в слое 20 см перед прикатыванием составляла 62 %.

Севооборот на торфяных слабоминерализованных почвах, как правило, состоит из сельскохозяйственных культур: многолетние злаковые травы; однолетние травы; пропашные культуры. Пропашные культуры для нормального роста и развития требуют большие площади и междурядную обработку почвы, что приводит к наличию открытой нагреваемой поверхности, а также в процессе роста и развития растений потребляют значительное количество влаги, что приводит к ее иссушению.

Таким образом, обязательно проведение систематического мониторинга за теплофизическим состоянием торфяной почвы с целью предотвращения торфяных пожаров.

## **Глава 6. Новая система мониторинга торфяных почв для предотвращения их самовозгорания и вынужденного зажигания**

Наиболее распространенным способом, позволяющим осуществлять мониторинг пожароопасных территорий, можно назвать использование специализированной аппаратуры, работающей в инфракрасной области электромагнитного излучения, располагающейся на борту космических аппаратов или самолетов. Они неприменимы для торфяников, вовлеченных в сельскохозяйственный оборот, поскольку фиксируют сам факт торфяного пожара, что влечет за собой уничтожение урожая и плодородной почвы, и потерю земель.

В природных условиях процесс уменьшения температуры (охлаждения) участков нагретого тела происходит с разными (неравномерными) скоростями. Критерий неравномерности нагрева определяется по уравнению:

$$\psi = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_{Ц}}, \quad (15)$$

где  $\Delta T_F$  – разность между температурами поверхности нагреваемого материала и окружающей среды;  $\Delta T_{Ц}$  – разность между температурами теплофизического центра нагреваемого материала и окружающей среды  $T_{Ц} - T_{ОКР}$ .

Таким образом, создаются условия для возникновения процесса самовозгорания и вынужденного зажигания, а снижение критерия неравномерности нагрева является предпосылкой начала процесса самовозгорания.

В качестве системы пожарного мониторинга торфяных почв на рисунке 15 предложена схема (патент РФ на полезную модель № 67872).

Поступление сигнала о равенстве температур от терморезистора, расположенного на поверхности торфяной почвы, и терморезисторов, расположенных в центре торфяных слоев, говорит о создании предпосылки возникновения очага торфяного пожара в месте установки устройства. Это позволяет своевременно провести мероприятия по профилактике возгорания торфяного слоя, что значительно меньше по экономическим затратам, чем ликвидация самого пожара. Указанное устройство размещается в наиболее прогреваемых местах на торфяниках.



Рисунок 15 – Схема устройства для мониторинга за состоянием торфяника

Преимущества нового способа мониторинга заключаются в следующем: торфяные пожары требуют больших экономических и материальных затрат на их ликвидацию, а разработанный способ мониторинга позволяет их предотвращать; значительно меньше экономических затрат требуется на профилактику торфяных пожаров, чем на тушение данных пожаров; данный способ мониторинга позволяет применить предупредительные меры и не допустить возгорания торфяной почвы на сельскохозяйственных угодьях.

По результатам практических и теоретических исследований разработан и сертифицирован в системе ОС «СИСТЕМ-ТЕСТ» ФГУ «ЦСА ОПС» МВД России контроллер возгораний «Леший» по ГОСТ Р 53325-2009 «Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования. Методы испытаний». Данный контроллер определяет пожароопасное состояние торфяной почвы и является основой нового способа мониторинга сельскохозяйственных земель.

Новый способ мониторинга позволяет определять степени пожарной опасности торфяников в реальном режиме времени, а также накапливать данные, на основе которых можно заблаговременно составлять прогнозы развития пожароопасной ситуации с привязкой к метеоданным.

Разработано два варианта системы мониторинга: мобильный – предназначен для обходчиков территории и патрулей; стационарный, устанавливаемый на контролируемой территории с дистанционной передачей данных.

На рисунке 16 представлен контроллер возгораний «Леший», который позволяет производить мониторинг территорий сельскохозяйственных угодий.



а



б

Рисунок 16 – Контроллер возгораний «Леший»:  
а – мобильный вариант; б – стационарный вариант

При стационарном варианте на местности устанавливается блок системы мониторинга, который передает информацию на персональный компьютер. Информация от контроллеров возгорания, через полученные данные анализируется и обрабатывается при помощи программного обеспечения. Положение на местности блока управления и контроллеров возгорания «Леший» позиционируются системой ГЛОНАСС. Минимальное количество контроллеров на 1 км<sup>2</sup> – 4 штуки. Принципиальная схема работы стационарной системы мониторинга в зоне действия сотовых операторов представлена на рисунке 17.

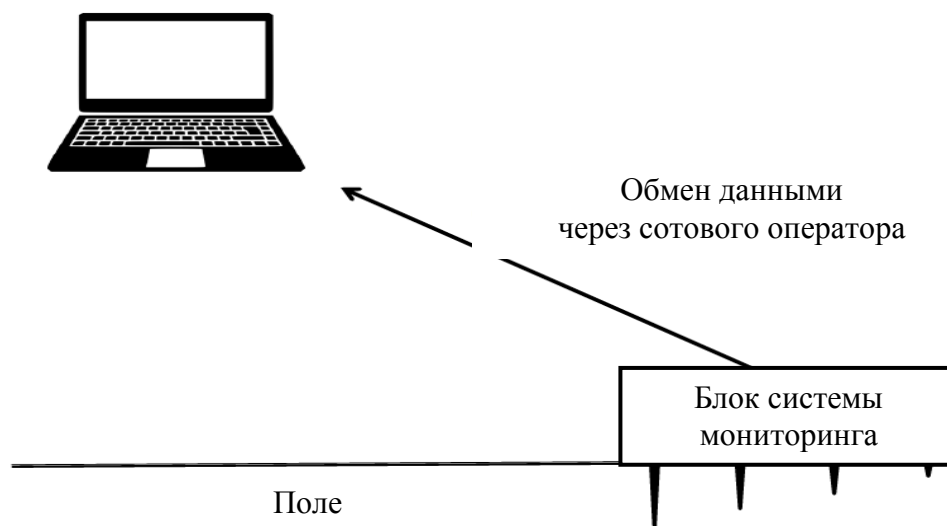


Рисунок 17 – Принципиальная схема работы стационарной системы мониторинга

Инновационная система мониторинга торфяников позволяет определить степени пожарной опасности торфяника за несколько дней до возникновения очагов тления или пламенного горения.

На рисунке 18 представлена схема работы стационарной системы мониторинга, когда передача данных через сотовых операторов невозможна.

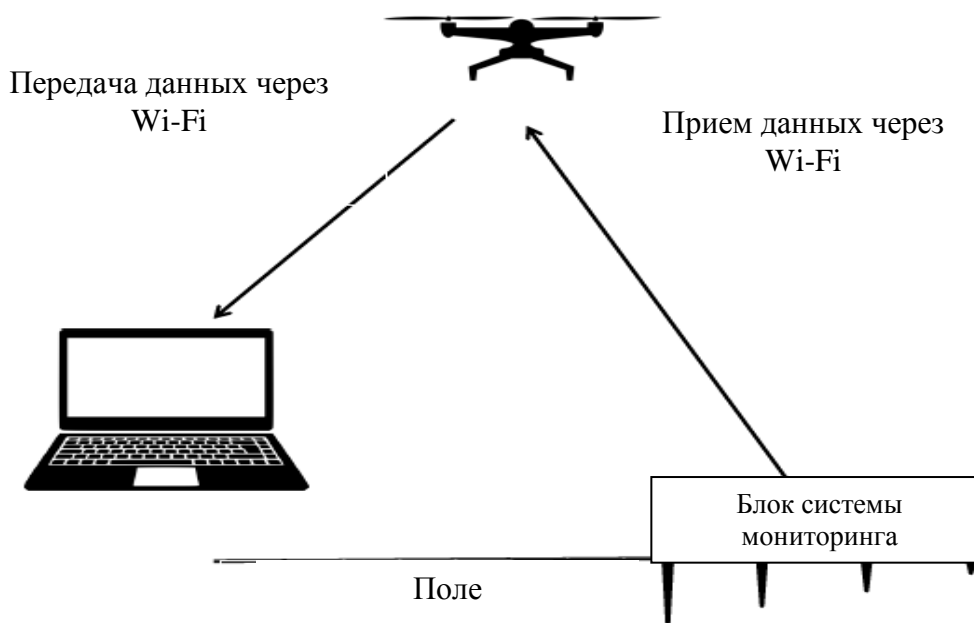


Рисунок 18 – Принципиальная схема работы стационарной системы мониторинга вне зоны действия сотовых операторов

Дрон может обеспечивать покрытие сотовой связи на территории в десятки или сотни квадратных километров. Беспилотники могут работать как непосредственно с абонентами, так и обеспечивать канал для наземных станций связи, которые обеспечивают раздачу интернета по Wi-Fi или через сети фиксированного доступа, или записывать информацию на карты памяти.

## **Глава 7. Экономическая эффективность применения комплекса машин для изменения теплофизических свойств торфяной почвы**

По исследованиям, проведенным Министерством сельского хозяйства, на территории Российской Федерации зафиксировано свыше 25 тыс. природных пожаров на общей площади более 1,1 млн га. На территории страны обнаружено порядка 28,5 тыс. очагов природных пожаров на общей площади более 886 тыс. га, из них выделено 1146 очагов торфяных пожаров.

Торфяные пожары причиняют огромный ущерб окружающей среде, качеству жизни человека, эффективности его деятельности, сельскому хозяйству, а также в целом экономике страны. Согласно заключению Общественной комиссии по расследованию причин и последствий природных пожаров в России в 2010 г. материальный ущерб был оценен в 12 млрд руб.

По оценке Министерства сельского хозяйства общий экономический ущерб от природных пожаров, по состоянию на 13 августа 2010 г., прогнозировался на уровне 10 трлн руб. (375 млрд долл.).

Сегодня в России площадь мелиорированных земель сельскохозяйственного назначения уменьшилось до 5 % от общей площади сельскохозяйственных земель, в том числе и по причине торфяных пожаров.

Возгоранию подвержены осушаемые болотные массивы в период летней межени на фоне высоких температур. После пожаров на осушаемых болотах остаются пирогенно измененные торфяные почвы. Площадь пирогенных образований составляет до 50...60 % выгоревшей территории сельскохозяйственных угодий.

В процессе торфяных пожаров в РФ за 2010 г., по результатам исследований геобиоцентра Мюнхенского университета (Германия), в приземные слои атмосферы планеты было выброшено от 30 до 100 млн т двуокиси углерода.

По заключениям экспертов массовый выброс углекислоты от природных пожаров в 2010 г. составил порядка 400 млн т (что соответствует 18 % годовых всех антропогенных поступлений парниковых газов в России).

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Наиболее экономически эффективным является рекультивация выработанных торфяников под сельскохозяйственное использование с последующим производством растениеводческой продукции.

2. Осушаемые торфяные почвы в России в настоящее время используют, преимущественно для возделывания пропашных и зерновых в условиях черной культуры земледелия. Поверхность выработанного торфяника при черной культуре освоения открыта для возникновения торфяных пожаров. Площадь пирогенных образований составляет до 50...60 % выгоревшей территории сельскохозяйственных угодий.

3. Пирогенные образования обладают низким плодородием, сельскохозяйственное производство на них возможно только после внесения значительных масс органических (до 100...150 т/га) и минеральных удобрений.

4. Применительно к торфяным почвам можно сделать заключение, что при иссушении верхнего слоя торфяной почвы происходит его разуплотнение

и, как следствие, обогащение кислородом в результате понижения уровня грунтовых вод, что приводит к более быстрому формированию самораспространяющейся волны горения и уменьшению времени зажигания верхнего слоя торфяной почвы, что подтверждается приведенными экспериментальными исследованиями.

5. На торфяной почве, за период проведения полевых исследований температура поверхности почти всегда превышала температуру воздуха. Температура в слое 0...5 см в несколько раз превышала температуру поверхности почвы и температуру воздуха, то есть, согласно лабораторным и теоретическим исследованиям, создавалась предпосылка самовозгорания данного слоя торфяной почвы.

6. Разработанная для полевых условий математическая модель позволяет прогнозировать возможность возникновения торфяного пожара. Максимальное расхождение между расчетными и опытными полевыми данными составило 18,3 %, минимальное – 1,6 %, а среднее – 9,2 %.

7. В качестве противопожарных, профилактических мероприятий торфяников, вовлеченных в сельскохозяйственный оборот, является применение специальных обработок с использованием комплекса машин в условиях черной культуры освоения, при которых происходит изменение водно-физических свойств слоя торфа, что препятствует возникновению пожара. При увеличении плотности торфяного слоя до максимальных значений пожароопасный период двигается до 8 месяцев, тогда как в средней полосе его длительность составляет 4 месяца (с апреля по август), то есть возникновение торфяных пожаров на торфяниках становится невозможным. Плотность торфа считается максимально устойчивой характеристикой. Ее величина способна колебаться в узком диапазоне от 1,65 и до 1,43 г/см<sup>3</sup> для верхового торфа и от 1,78 до 1,56 г/см<sup>3</sup> для низинных слоев.

8. Новый способ мониторинга позволяет определять степени пожарной опасности торфяников в режиме реального времени, а также накапливать данные, на основе которых можно заблаговременно составлять прогнозы развития пожароопасной ситуации с привязкой к метеоданным.

## **РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ**

1. Научная перспектива заключается в дальнейшем проведении исследований по возникновению торфяных пожаров на землях сельскохозяйственного назначения.

2. Совершенствование системы мониторинга за пожарной опасностью торфяных почв и технологических операций по изменению их теплофизических свойств.

3. При низком плодородии почв Центральной Нечерноземной зоны РФ в соответствии с Государственной программой «Эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации», согласно Постановления Правительства Российской Федерации от 14 мая 2021 г. № 731, необходимо вводить в оборот выработанные торфяники, которые обладают высокой продуктивностью и

наличием мелиоративной системы.

4. Разработанный способ мониторинга и технологическая схема по изменению теплофизических свойств торфяных почв с комплексом машин рекомендуется к применению как на вводимых, так и используемых в сельскохозяйственном обороте торфяниках.

## СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Рецензируемые издания, рекомендуемые ВАК

1. Евграфов, А.В. Экологический мониторинг эрозии почв склоновых земель по водному и температурному режиму / А.В. Евграфов, С.И. Харитонов // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2007. – № 12. – С. 65–66.

2. Евграфов, А.В. Использование сельскохозяйственной и специальной техники для тушения торфяных пожаров / А.В. Евграфов // Вестник Московского государственного агроинженерного университета имени В.П. Горячкина. – 2007. – Вып. 2(22). – С. 72–73.

3. Дубенок, Н.Н. Результаты исследований и моделирования самовозгорания торфяных почв / Н.Н. Дубенок, А.В. Евграфов // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2008. – № 4. – С. 17–23.

4. Дубенок, Н.Н. Самовозгорание торфяной почвы при изменении водного и воздушного режимов / Н.Н. Дубенок, А.В. Евграфов // Плодородие. – 2008. – № 5(44). – С. 41–42.

5. Дубенок, Н.Н. Альтернативный способ экологического мониторинга пожаров на торфяных почвах / Н.Н. Дубенок, А.В. Евграфов // Доклады РАСХН. – 2008. – № 6. – С. 34–35.

6. Евграфов, А.В. Экономическая эффективность экологического мониторинга торфяников на основе оценки соотношения температур центра и поверхности иссушенного слоя торфа / А.В. Евграфов // Вестник Московского государственного агроинженерного университета имени В.П. Горячкина. Экономика и организация производства в агропромышленном комплексе. – 2008. – Вып. 5/1(30). – С. 73–75.

7. Евграфов, А.В. Экономическая эффективность использования экологически безопасного комплекса противоэрозионных мероприятий на склоновых землях / А.В. Евграфов, М.В. Климахина // Вестник Московского государственного агроинженерного университета имени В.П. Горячкина. – 2008. – № 5-1(30). – С. 67–69.

8. Евграфов, А.В. Причины возникновения лесных торфяных пожаров и разработка нового способа его предупреждения / А.В. Евграфов // Нива Поволжья. – 2009. – № 2(11). – С. 87–90.

9. Савоськина, О.А. Влияние противоэрозионных обработок склоновых земель на поверхностный сток при дождевании / О.А. Савоськина, А.В. Евграфов, С.И. Харитонов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2009. – № 4. – С. 25–26.

10. Евграфов, А.В. Моделирование сезонного изменения плотности почв в



Нечерноземной зоне РФ / А.В. Евграфов, М.В. Климахина // Природообустройство. – 2010. – № 5. – С. 25–29.

11. Евграфов, А.В. Инновационный метод мониторинга лесоторфяных пожаров и его приборное обеспечение / А.В. Евграфов // Природообустройство. – 2011. – № 3. – С. 17–21.

12. Евграфов, А.В. Мониторинг уровня грунтовых вод с целью предупреждения лесоторфяных пожаров / А.В. Евграфов // Природообустройство. – 2012. – № 1. – С. 19–22.

13. Евграфов, А.В. Особенности формирования поверхностного стока при поливе дождеванием в агроландшафтах Нечерноземья / А.В. Евграфов, М.В. Климахина, Е.В. Мацыганова // Мелиорация и водное хозяйство. – 2013. – № 4. – С. 13–16.

14. Евграфов, А.В. Система мониторинга лесоторфяных пожаров с использованием ГИС-технологий / А.В. Евграфов, М.В. Климахина, Е.В. Мацыганова // Проблемы региональной экологии. – 2014. – № 4 (июль-август). – С. 218–222.

15. Евграфов, А.В. Инновационная система оценки вероятности возникновения лесоторфяных пожаров / А.В. Евграфов, В.Н. Павленко // Природообустройство. – 2015. – № 5. – С. 104–107.

16. Слесарев, М.Ю. Система профилактики торфяников от возгорания / М.Ю. Слесарев, А.В. Евграфов // Природообустройство. – 2016. – № 1. – С. 102–105.

17. Евграфов, А.В. Повышение пожарной устойчивости торфа с использованием специальной техники / А.В. Евграфов // Природообустройство. – 2016. – № 2. – С. 102–106.

18. Мартынов, Д.Ю. Оптимизация систем водоподготовки и мелиорации сельскохозяйственных культур на территориях, отдаленных от водных объектов и крупных водопроводных систем / Д.Ю. Мартынов, А.И. Новиченко, А.В. Евграфов, А.В. Шкуренок, Т.Г. Орлова // Научное обозрение. – 2016. – № 16. – С. 46–55.

19. Бондарева, Г.И. Экологические ограничения землепользования мелиорированных земель / Г.И. Бондарева, А.В. Евграфов, С.И. Харитонов // Сельский механизатор. – 2021. – С. 3–5.

20. Бондарева, Г.И. Оценка выбывших из оборота сельскохозяйственных земель Нечерноземной зоны по категории загрязнения / Г.И. Бондарева, А.В. Евграфов, С.И. Харитонов, А.Ю. Кульчев // Сельский механизатор. – 2022. – № 5. – С. 26–27.

21. Дидманидзе, О.Н. Влияние плотности торфяных почв на возникновение ландшафтных пожаров / О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов // Природообустройство. – 2022. – № 4. – С. 37–41.

22. Дидманидзе, О.Н. Результаты исследований температурного режима осушаемой торфяной почвы / О.Н. Дидманидзе, Е.П. Парлюк, А.В. Евграфов // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25. – № 1. – С. 45–49.

**Издания, индексируемые в международных наукометрических базах  
Web of Science и Scopus**

23. Bondareva, G.I. Metrological support characteristics for of agricultural machines / G.I. Bondareva, A.V. Evgrafov, A.Y. Ermolaeva // International scientific conference «Metrological support of innovative technologies – ICMSIT-2020» (Krasnoyarsk, 4 марта 2020 г.). – Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – Vol. 1515.

24. Evgrafov, A.V. The results of laboratory and field studies of thermophysical processes necessary for the occurrence of landsape fires in natural swamps / A.V. Evgrafov, V.A. Shevchenko, G.I. Bondareva // IOP conference Series: Earth and environmental science (Krasnoyarsk, Russian Federation, 2021). – IOP Publishing Ltd., 2021. – Vol. 848.

**Патенты на изобретения и полезные модели**

25. Патент РФ на полезную модель № 67872. Система мониторинга температурного состояния торфяника: № 2007117625/22: заявл. 14.05.2007: опубл. 10.11.2007 / Дубенок Н.Н., Евграфов А.В. – БИПМ № 31. – 17 с.

26. Патент РФ на полезную модель № 78033. Система автоматического полива растений для приусадебного хозяйства: № 2008126063/22: заявл. 27.06.2008: опубл. 20.11.2008 / Дубенок Н.Н., Евграфов А.В., Харитонов С.И., Климахина М.В., Мялов А.В. – БИПМ № 32. – 18 с.

27. Патент РФ на полезную модель № 88970. Система защиты торфяников от возгорания: № 2009123735/22: заявл. 23.06.2009: опубл. 27.11.2009 / Дубенок Н.Н., Евграфов А.В., Харитонов С.И., Климахина М.В., Мялов А.В. – БИПМ № 33. – 18 с.

28. Патент РФ на полезную модель № 106542. Комплексная система мониторинга и защиты торфяников от возгорания: № 2011104075/12: заявл. 07.02.2011: опубл. 20.07.2011 / Евграфов А.В., Щербаков П.С., Климахин В.Ю. – БИПМ № 20. – 24 с.

29. Патент РФ на полезную модель № 124176. Пластмассовый кольцевой элемент сборного фильтра-каркаса: № 2012132620/05: заявл. 31.07.2012: опубл. 20.01.2013 / Евграфов А.В., Щербаков П.С. – БИПМ № 2. – 12 с.

30. Патент № 2767075 С1 Российская Федерация. Способ утилизации жидкой фракции животноводческих стоков: № 2021121743: заявл. 22.07.2022: опубл. 16.03.2022 / Харитонов С.И., Шевченко В.А., Бондарева Г.И., Евграфов А.В. – 8 с.

**Публикации в научных изданиях**

31. Евграфов, А.В. Мелиоративные мероприятия в системе борьбы с торфяными пожарами / А.В. Евграфов // Доклады ТСХА. – Вып. 279. – Ч. 2. – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2007. – С. 225–227.

32. Евграфов, А.В. Обоснование экономической эффективности экологического мониторинга торфяников в системе борьбы с торфяными и лесными пожарами / А.В. Евграфов // Вестник Калмыцкого института социально-экономических и социальных исследований. – 2007. – № 1. – С. 63–66.

33. Евграфов, А.В. Гидротермическая характеристика Московской области, с точки зрения торфяных пожаров / А.В. Евграфов // Вестник Международной общественной академии экологической безопасности и природопользования (МОАЭБП). – 2008. Вып. № 1(8). – С. 58–62.

34. Евграфов, А.В. Обоснование принципов моделирования самовозгорания торфяных почв / А.В. Евграфов // Вестник института комплексных исследований аридных территорий. – 2008. – Вып. 1(16). – С. 28–32.

35. Евграфов, А.В. Устройство для прогнозирования торфяных пожаров / А.В. Евграфов // Вестник Международной общественной академии экологической безопасности и природопользования (МОАЭБП). – 2008. – Выпуск № 4(11). – С. 62 – 68.

36. Евграфов, А.В. Развитие агропромышленного комплекса: перспективы, проблемы и пути решения. Влияние объемной плотности торфяной почвы на процесс самовозгорания / А.В. Евграфов // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 450-летию г. Астрахань. – Астрахань, 2008. – С. 66–69.

37. Дубенок, Н.Н. Математическая модель самовозгорания торфяной почвы / Н.Н. Дубенок, А.В. Евграфов // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных мелиоративных технологий. – Вып. 3. – Рязань, 2008. – С. 56–61.

38. Дубенок, Н.Н. Новый способ мониторинга возникновения пожаров на торфяных почвах / Н.Н. Дубенок, А.В. Евграфов // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных мелиоративных технологий. – Вып. 3. – Рязань, 2008. – С. 52–56.

39. Евграфов, А.В. Обоснование принципов моделирования самовозгорания торфяных почв / А.В. Евграфов // Вестник Калмыцкого института социально-экономических и социальных исследований. – 2008. – № 1. – С. 28–31.

40. Евграфов, А.В. Почвенная обработка в системе борьбы с торфяными пожарами / А.В. Евграфов // Материалы IV Международной научно-практической конференции, проведенной 15 октября 2008 г. («ИНФОРМАГРО-2008»). – Москва, 2009. – С. 452–459.

41. Евграфов, А.В. Инновационная система мониторинга торфяных месторождений с целью предупреждения их возгорания / А.В. Евграфов, М.В. Климахина // Материалы всероссийского торфяного форума. – Эммаус, 2011. – С. 45–46.

42. Короткий, В.М. Системное возрождение торфоразработок как инновационное направление в рациональном и экологически безопасном природопользовании / В.М. Короткий, Г.Б. Мелентьев, Г.Т. Шкиперова, Е.Н. Малинина, А.В. Евграфов // Сб. материалов Российской межрегиональной конференции «Ресурсно-экологические проблемы Волжского бассейна». – Владимир, 2011. – С. 10–16.

43. Евграфов, А.В. Приборное обеспечение инновационного метода мониторинга лесоторфяных пожаров / А.В. Евграфов // Материалы II Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», 2012. –

С. 216–223.

44. Евграфов, А.В. Мероприятия по борьбе с лесо-торфяными пожарами с применением современных технологий / А.В. Евграфов, В.Г. Забродин // Доклады ТСХА. – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2018. – С. 284–286.

45. Максименко, В.П. Оперативный мониторинг метеорологических параметров при управлении режимами увлажнения на осушительно-увлажнительных системах / В.П. Максименко, А.В. Евграфов, Ю.А. Хомутов // Сборник научных трудов. – Москва: ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова, 2018. – С. 143–147.

46. Евграфов, А.В. Природные причины возникновения лесных пожаров / А.В. Евграфов, О.А. Зарщикова // Материалы международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 150-летию рождения В.П. Горячкина. – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2018. – С. 669–674.

47. Евграфов, А.В. Пожарная профилактика по предупреждению лесных верховых пожаров / А.В. Евграфов, О.А. Горностаева // Международная научная конференция, посвященная 175-летию К.А. Тимирязева – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. – С. 111–115.

48. Максименко, В.П. Методические положения по обоснованию количественных характеристик элементов водного баланса при регулировании режимов влажности почвы на осушительно-увлажнительных системах / В.П. Максименко, А.В. Евграфов, С.А. Меньшикова, Т.Л. Волчкова // Сборник научных трудов. – Москва: ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова, 2019. – С. 215–221.

49. Шевченко, В.А. Оценка биологических особенностей сельскохозяйственных культур и структура севооборотов на вводимых в оборот мелиорированных землях Нечерноземной зоны России: методические указания / В.А. Шевченко, В.В. Бородычев, А.М. Соловьев, Г.И. Бондарева, А.В. Евграфов, Н.П. Попова, С.И. Харитонов. – Москва: ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова, 2020. – 51 с.

### **Монографии**

50. Евграфов, А.В. Водный режим земель и его взаимосвязь с торфяными пожарами / А.В. Евграфов. – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2009. – 164 с.

51. Шевченко, В.А. Агромелиоративные приемы восстановления плодородия деградированных и вышедших из оборота сельскохозяйственных земель и пастбищных территорий / В.А. Шевченко, А.В. Евграфов [и др.]. – Москва: ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова, 2022. – 205 с.