

На правах рукописи

Болотов Андрей Геннадьевич

ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ
ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Специальность 06.01.03 – агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Москва 2016

Работа выполнена на кафедре физики факультета природообустройства ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет»

Научный консультант: **Макарычев Сергей Владимирович**, д.б.н., профессор, заведующий кафедрой физики факультета природообустройства ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет»

Официальные оппоненты: **Худяков Олег Иванович**, д.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории экологии почв ФГБУН «Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН»

Скворцова Елена Борисовна, д.с-х.н., заведующая лабораторией физики и гидрологии почв ФГБНУ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева»

Зинченко Сергей Иванович, д.с-х.н., профессор, заместитель директора по науке ФГБНУ «Владимирский НИИСХ»

Ведущая организация: ФГБУН «Институт водных и экологических проблем СО РАН»

Защита состоится 14 февраля 2017 г. в 15 час. 30 мин. в аудитории М-2 на заседании диссертационного совета Д 501.002.13 при МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.12, факультет почвоведения, факс (495) 939-09-89

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, 27, отдел диссертаций) или на сайтах: <http://soil.msu.ru/nauka/uchenyj-sovet/2438-bolotov>;

<http://istina.msu.ru/dissertations/27908466/>

Автореферат разослан «___» _____ 201_ г.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании Диссертационного совета. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по вышеуказанному адресу.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Н.В. Костина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Лимитирующими факторами продуктивности пахотных почв Алтайского края являются недостаток влаги в сухой степи и дефицит тепла в лесостепной почвенно-климатической зоне. Это делает актуальным разработку теоретических основ управления гидротермическим состоянием почв и поиск путей его оптимизации. В настоящее время при резко меняющихся погодных условиях изучение гидротермического состояния почв приобретает особую актуальность. Возрастающая частота аномальных климатических явлений заставляет по-новому взглянуть на проблемы тепло-гидрофизики почв.

С появлением современных приборов и устройств появилась возможность усовершенствовать существующие методы, и расширить границы их применимости. Поэтому совершенствование и создание приборов, которые позволили бы проводить долговременный гидротермический мониторинг в почвенном профиле, на сегодняшний день остаются актуальными.

В настоящей работе предложена и обоснована методика определения гидротермического режима почвы с помощью физически обоснованной прогнозной модели *Hydrus*. Изучена зависимость ошибки расчета режима влажности от краевых условий. Разработанная методика и инструментальная база была апробирована при изучении гидротермического состояния почв Алтайского края.

Цель работы: исследование региональных и зональных закономерностей тепло- и гидрофизических свойств почв и моделирование гидротермического режима почвенного покрова Алтайского края.

Задачи исследования:

- изучить основные физические свойства почв Алтайского края, определяющие водный и тепловой режимы в системе их генетических горизонтов;

- исследовать региональные и зональные особенности гидротермических функций и параметров почв исследуемого региона;
- обосновать расчет гидрофизических свойств почвы по данным о её физических свойствах с применением педотрансферных функций;
- обосновать экспериментальное обеспечение входных параметров математической модели влагопереноса;
- обосновать выбор краевых условий математической модели тепловлагопереноса;
- разработать и усовершенствовать методы и устройства для исследования гидротермических свойств и режимов почвенного покрова.

Научная новизна:

- для прогнозного физически обоснованного моделирования гидротермического состояния почв Алтайского края впервые экспериментально получены входные гидротермические параметры, различного пространственного разрешения (региональные и зональные). Обоснован выбор краевых условий в виде гидротермических режимов на верхней и нижней границе почвенной толщи и их начальное распределение;
- получены региональные педотрансферные функции, позволяющие рассчитывать гидрофизические параметры почв по их физическим свойствам;
- для оценки гидротермического состояния почв теоретически обоснована и разработана совокупность инструментальных и вычислительных средств, а также методика исследований, которые позволяют получать почвенно-гидротермическую информацию в долговременном агрофизическом мониторинге.

Основные защищаемые положения

- Водоудерживающая способность почв юго-востока Западной Сибири и влажность почвы при её максимальной температуропроводности увеличиваются при переходе от сухой степи до предгорий Алтая (Салаира) с одновременным уменьшением плотности почвы по всему профилю,

увеличением содержания органического вещества, снижением содержания песчаной фракции и возрастанием доли пыли и ила. В почвах сухой и засушливой степи изменение температуропроводности с увеличением влажности происходит более динамично и в более узком диапазоне увлажнения, чем в почвах колючей степи, лесостепи и предгорий Алтая (Салаира).

- Полученные параметры гидротермических функций характеризуют диапазон изменения гидро- и теплофизических свойств почв в зависимости от влажности и их физических свойств. Идентификация и параметризация физически обоснованной модели тепловлагопереноса в почвах определяется прогнозируемыми задачами при приоритетном получении расчетных величин влажности и температуры почвы с минимально возможной погрешностью и/или минимизацией проводимой работы по экспериментальному обеспечению входных параметров.

- Доказано, что наиболее адекватным экспериментальным обеспечением динамической модели тепловлагопереноса в почвах Алтайского края является использование зональных гидротермических параметров, региональных педотрансферных функций и верхнего граничного условия 1-рода.

- Разработанная приборная база в совокупности с обоснованием экспериментального обеспечения модели тепловлагопереноса позволяет получать почвенно-гидротермическую информацию в долговременном агрофизическом мониторинге и является эффективным инструментом для оценки и моделирования гидротермического состояния почв, управления, адаптации к изменениям условий окружающей среды, применения решений в почвенно-мелиоративной практике.

Практическая значимость диссертации

Полученные результаты могут являться основой для мониторинговых исследований и прогнозирования почвенно-экологических изменений на территории Алтайского края. Предложенные и использованные в работе

методики могут быть использованы сельскохозяйственными предприятиями и научными организациями при разработке современных научно-обоснованных агротехнологий, при разработке проектов рационального природопользования, экологического мониторинга, создании управляемых агроценозов, при обосновании зональных систем земледелия и объектов мелиоративного строительства.

Проведение лабораторных исследований было поддержано РФФИ (№ 12-04-90862). Часть полевых исследований выполнена в рамках договора НИР с АНО «Центр экологических инноваций», г. Москва (№ 54-2011).

Апробация работы

Основные результаты работы представлены на VI и VII съезде Докучаевского общества почвоведов (Петрозаводск, 2012; Белгород, 2016); на международных, всероссийских и региональных конференциях «Антропогенное воздействие на лесные экосистемы» (Барнаул, 2002), «Гидроморфные почвы – генезис, мелиорация и использование» (Москва, 2002), «Южная Сибирь: проблемы взаимодействия природы и общества» (Барнаул, 2003), «Проблемы рационального природопользования в Алтайском крае» (Барнаул, 2005), «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (Барнаул, 2009, 2011, 2012, 2015, 2016), «Экологические проблемы природопользования в Сибири» (Барнаул, 2010), «Вавиловские чтения – 2010» (Саратов, 2010), «Региональные экологические проблемы» (Барнаул, 2011), «Новые направления в решении проблем АПК на основе современных ресурсосберегающих инновационных технологий» (Владикавказ, 2011), «Устойчивое развитие АПК: рациональное природопользование и инновации» (Петрозаводск, 2011), «Проблемы и перспективы инновационного развития мирового сельского хозяйства» (Саратов, 2011), «Актуальные проблемы науки» (Тамбов, 2011), «Лес и изменение климата: адаптация, управление, финансирование» (Чемал, 2012), «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» (Ульяновск, 2011), «Развитие устойчивого лесопользования в

России и его продвижение в Алтае-Саянском экорегионе» (Барнаул, 2013), «Перспективы развития научных исследований в 21 веке» (Махачкала, 2013), «Современные научные исследования: инновации и опыт» (Екатеринбург, 2014), «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства» (Краснодар, 2015), «Переход к зеленой экономике и устойчивому развитию в Алтайском крае: перспективы, механизмы, ключевые направления» (Барнаул, 2015), на заседаниях кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова (2012, 2016), на заседаниях кафедры физики АГАУ (2001-2016).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 93 печатные работы, в том числе 4 монографии в соавторстве, 33 статьи в изданиях, предложенных Перечнем ВАК, 55 в сборниках научных статей, материалах конференций, научно-практических семинаров, получен 1 патент РФ.

Личный вклад автора

В диссертации нашли отражение результаты научных исследований, проведенных в период с 2001 по 2015 гг. при непосредственном участии автора в Алтайском государственном аграрном университете. Автор принимал личное участие на всех этапах исследования. Автором сформулированы цели работы, поставлены задачи исследования, планирование экспериментов, сделаны итоговые выводы. Экспериментальный материал получен лично автором или под его руководством в коллективных лабораторных, экспедиционных и стационарных исследованиях кафедры физики АГАУ и кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. В работе были также использованы материалы, полученные в соавторстве с соискателями, выполнявшими свои исследования под руководством автора. Доля личного участия в совместных публикациях пропорциональна числу авторов. Теоретические положения, математические модели и их решения, основная часть методов исследования разработана лично автором. Также в

работе использовались с соответствующими ссылками материалы, опубликованные в отечественных и зарубежных источниках.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 351 странице, состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы из 448 источников, в том числе 93 на иностранном языке, содержит 28 таблиц, 102 рисунка, 4 приложения.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному консультанту С.В. Макарычеву за помощь и активную поддержку при работе над диссертацией. Автор выражает благодарность своим друзьям и коллегам Ю.В. Беховых, С.Ю. Бондаренко, И.В. Гефке, А.А. Левину, Е.Г. Сизову, И.В. Шориной, за помощь при выполнении лабораторных и полевых экспериментов и поддержку при подготовке диссертации. Л.М. Татаринцеву за советы, которые помогли наметить программу исследований. С.И. Завалишину за помощь в описании морфологических особенностей горизонтов. Отдельная благодарность заведующему кафедрой физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова Е.В. Шеину за критику и поддержку идей, консультации и дискуссии, а также сотрудникам данной кафедры Е.Ю. Милановскому, Т.Н. Початковой, З.Н. Тюгай, А.В. Смагину, Д.Д. Хайдаповой, А.Б. Умаровой, Т.А. Архангельской, А.В. Дембовецкому за доброжелательность и помощь в работе и проведении лабораторных исследований, а также всем сотрудникам этой кафедры, принимавших участие в обсуждении диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Гидротермическое состояние почв (обзор литературы)

В главе рассмотрены основные понятия тепло- и гидрофизики почв. Приводится краткое описание основных подходов описания гидротермического состояния почв. Проанализирован опыт изучения тепло- и гидрофизических свойств и режимов почв. В результате было установлено, что различными научными коллективами в разное время были созданы

множество региональных моделей, основанных на феноменологических законах баланса и переноса и отличающихся в основном выбором краевых условий и региональной параметризацией. Для почв Алтайского края не определены региональные параметры и краевые условия для физически обоснованной модели тепловлагопереноса в почвах, что и обусловило цель настоящей работы.

Глава 2. Объекты и методы исследований

Объектами исследования являлись почвы территории юго-востока Западной Сибири, рельеф которой представлен равнинными территориями и предгорьями Алтая. Для изучения физических, тепло- и гидрофизических свойств почв в лабораторных условиях были использованы образцы, отобранные стандартным способом из генетических горизонтов типичных почвенных разрезов, заложенных в шести почвенно-климатических зонах Алтайского края и характеризующих следующие типы (подтипы) почв: 1) дерново-подзолистые; 2) каштановые, темно-каштановые, лугово-каштановые почвы; 3) черноземы южные, обыкновенные, выщелоченные, оподзоленные, лугово-черноземные почвы; 4) серые-лесные почвы; 5) аллювиально-луговые почвы.

Определение физических свойств почв проведено с помощью общепринятых методов (Вадюнина, Корчагина, 1986; Шеин, 2005, Теории и методы, 2007): плотность почвы буровым методом, гранулометрический состав пипет-методом с диспергацией 4% пирофосфата натрия. Капиллярно-сорбционное давление в зависимости от влажности (основная гидрофизическая характеристика – ОГХ) и коэффициент влагопроводности в зависимости от капиллярно-сорбционного давления (функция влагопроводности – ФВ) получены по данным о кинетике дренирования методом центрифугирования (Смагин, 2001) на центрифуге *TG16WS*. Содержание общего углерода и углерода карбонатов определено экспресс-анализатором *АН-7529М*, сжиганием в токе кислорода при 900°С, а образцы для определения углерода карбонатов обрабатывались 5% серной кислотой.

Содержание органического углерода получено как разность между содержанием общего углерода и содержанием углерода карбонатов. Определение полной удельной поверхности проводилось методом тепловой десорбции в газовом потоке гелия-азота на анализаторе *Сорбтометр-М* (ЗАО «Катакон», Новосибирск, РФ) в одноточечном экспресс-режиме при $P/P_0 = 0,2$. Исследования реологических свойств почв были проведены на модульном реометре *MCR-302* (Anton-Paar, Австрия), с использованием программного обеспечения *RHEOPLUS/32 V3.60*. При этом использовалась измерительная система «пластина-пластина» PP25 с расстоянием между пластинами 2 мм. Для поддержания постоянной температуры образца во время опыта применялась система термостабилизации на элементах Пельтье P-PTD200.

Полевая влажность по массе определена термостатно-весовым способом, с пересчетом в объемную, и электронным диэлькометрическим *FD* (Frequency Domain) влагомером-логгером *E+Soil MCT-sensor*, производства фирмы *Eijkelkamp Agrisearch Equipment* (Нидерланды), измеряющим непосредственно объемную влажность. Изучение теплового режима произведено многоканальным электронным измерителем температуры, разработанным автором и основанным на технологии 1-Wire с применением цифровых датчиков *DS18B20*, производства фирмы «*Dallas Semiconductor – Maxim*», США (Болотов, 2012). Теплофизические свойства исследуемых почв исследованы на многоканальном измерительном комплексе на основе модуля АЦПЦАП *ZET 210* (ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы», РФ) в авторской разработке (Болотов, 2012). В полевых условиях теплофизические свойства измерены мобильным прибором, реализованным на основе метода цилиндрического зонда (Болотов, 2003). Данный прибор защищен патентом РФ.

Моделирование гидротермического режима почв проводилось с помощью прогнозной модели *Hydrus-1D* (Simunek and van Genuchten). В России данный программный пакет рекомендован для применения в решении

фундаментальных и прикладных задач почвоведения кафедрой физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. При анализе экспериментальных данных использован сравнительно-географический метод в сочетании с исследованием морфологического строения профиля. Статистическая обработка полученных данных произведена с помощью программных пакетов *Excel*, *Signaplot* и *Statistica*. Лабораторные исследования проведены на кафедре физики АГАУ, на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, в ЦАС «Алтайский» и НИИХИМ АГАУ.

Глава 3. Физико-географические условия района исследования

В главе на основе закономерностей территориальной физико-географической дифференциации рассмотрены климатические условия за период исследований в сравнении со среднемноголетними значениями, а также особенности состояния почвенного и растительного покрова.

Глава 4. Агрофизические свойства исследованных почв

В главе рассматриваются результаты исследований морфологических особенностей, основных физических и физико-химических свойств основных типов почв Алтайского края. Подтверждена, выявленная ранее другими исследователями (Почвы..., 1959; Агрофизическая характеристика..., 1976; Бурлакова, 1984; Хмелев, 1989; Макарычев, 1992; Татаринцев, 1993, 2005, Татаринцев, 2008) закономерность зонального изменения физических и физико-химических свойств почв, заключающаяся в том, что по мере нарастания биоклиматического потенциала, интенсивности и продолжительности почвообразовательного процесса от сухой степи до предгорий Алтая происходит уменьшение плотности почвы по всему профилю, увеличивается общая пористость, адсорбционная и водоудерживающая способность, увеличивается содержание органического вещества и мощность гумусового горизонта, уменьшается содержание песчаной фракции и увеличивается доля пыли и ила.

Глава 5. Гидротермические свойства почв Алтайского края

В работе получены экспериментальные ОГХ для основных диагностических горизонтов зональных почв Алтайского края. Аппроксимация проведена в программном пакете *RETSC* (van Genuchten et al. 1991) функцией модели ОГХ ван Генухтена и ван Генухтена-Муалема:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha P)^n\right)^m} + \theta_r, \quad K = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{m}}\right]^m\right]^2, \quad m = 1 - \frac{1}{n},$$

где θ – объемная влажность почвы, $см^3/см^3$; θ_r – параметр минимальной влажности, соответствующий прочносвязанной, неподвижной для вязкого течения влаги, $см^3/см^3$; θ_s – объемная влажность почвы, соответствующая полному влагонасыщению, $см^3/см^3$; α – величина, обратно пропорциональная давлению входа воздуха (давлению барботирования), $1/см^3$; n – индекс распределения пор по размерам, характеризующий наклон ОГХ; K_s – коэффициент фильтрации, $см/сут$.

Для всех разновидностей почв установлена общая закономерность: значения капиллярно-сорбционного давления в капиллярной области увеличиваются от сухой степи до предгорий Алтая. По мере утяжеления гранулометрического состава от супесчаного до тяжелосуглинистого происходит смещение кривых ОГХ вправо, в область больших влажностей, т.к. при этом уменьшается количество крупных и средних пор при одновременном увеличении доли мелких пор.

Получены региональные, зональные и некоторые внутризональные аппроксимационные параметры (всего 119 значений каждого параметра) с учетом изменения их по профилю, с предварительной группировкой массива экспериментальных данных на классификационном уровне. Найденные параметры θ_r, θ_s, n и α использованы при сравнительном анализе свойств зональных почв (рис.1).

Параметры θ_r и θ_s увеличиваются при переходе от зоны сухой степи к предгорьям Алтая (Салаира), что связано с увеличением содержания гумуса и содержания илистой фракции. При этом пахотные и подпахотные горизонты средне- и тяжелосуглинистых почв отличаются более высокими значениями этого параметра в сравнении с нижележащими горизонтами, что также объясняется значительным содержанием гумуса.

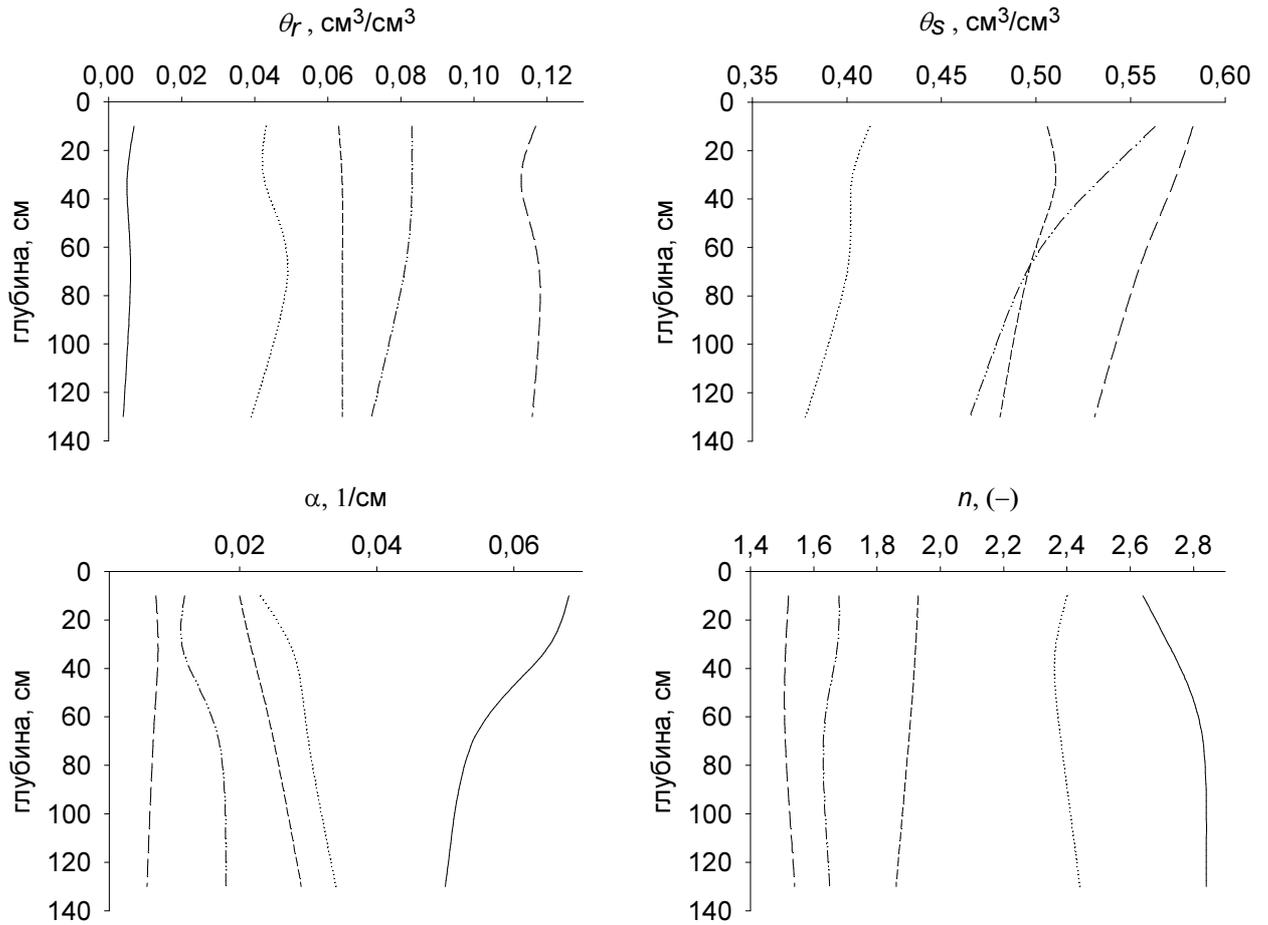


Рис.1. Профильное распределение параметров модели ОГХ ван Генухтена в зональных почвах Алтайского края:

- Дерново-подзолистые почвы сухой степи,
- Каштановые почвы сухой степи,
- Черноземы южные засушливой степи,
- · - · - · Черноземы выщелоченные колочной степи,
- · — · — Черноземы выщелоченные предгорий Алтая.

Параметры α и n максимальны для почв сухой степи и уменьшаются при переходе к предгорьям, что объясняется увеличением содержания гумуса и содержания тонкодисперсных фракций, вследствие этого происходит увеличение величины давления барботирования и угла наклона капиллярной области ОГХ.

Характер поведения кривых профильного распределения параметров модели ОГХ ван Генухтена различен для зональных почв и в основном соответствует распределению гранулометрических фракций, органического вещества и илистой фракции, а также отображает физическое состояние почвы, характеризующееся совокупностью её свойств и режимов в текущий момент.

Синхронно с измерением давления почвенной влаги были определены функции влагопроводности по данным о кинетике центрифугирования. При изменении капиллярно-сорбционного давления от 0 до 1000 *кПа* коэффициент влагопроводности в пахотных почвах Алтайского края имеет максимальные значения в каштановых почвах сухой степи 220 *см/сут* ($P_{(Kf=0)}=60$ *кПа*), в черноземах южных засушливой степи 114 *см/сут* ($P_{(Kf=0)}=86$ *кПа*), в черноземах выщелоченных колючной степи 79 *см/сут* ($P_{(Kf=0)}=364$ *кПа*), в черноземах выщелоченных предгорий Алтая 46 *см/сут* ($P_{(Kf=0)}=603$ *кПа*).

Коэффициент фильтрации имеет максимальные значения при минимальных значениях тонкодисперсных фракций и максимальных грубодисперсных. При уменьшении величины плотности и содержания физической глины значения K_S максимальны, а при величинах плотности почвы более 1,4 *г/см³* и при содержании физической глины более 60% почва становится практически водоупором.

Экспериментальные исследования теплофизических свойств почв Алтайского края отражены в работах С.В. Макарычева (1978, 1996, 2000, 2001). Нами были продолжены и дополнены эти исследования. Произведена параметризация накопленного массива теплофизических данных основных типов почв функцией, предложенной Т.А. Архангельской (2008):

$$\kappa = \kappa_0 + a \exp \left[-0,5 \left(\ln \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right) b^{-1} \right)^2 \right], \text{ где } \kappa_0, \lambda_0, a, b, \theta_0 - \text{параметры кривой.}$$

Полученные параметры использованы при сравнительном анализе теплообменных свойств почв. Так коэффициент θ_0 позволяет однозначно

маркировать критическую точку насыщения (максимум температуропроводности), в которой создаются наилучшие условия комбинированного теплопереноса, и соответствует влажности разрыва капиллярной связи для суглинков (рис.2).

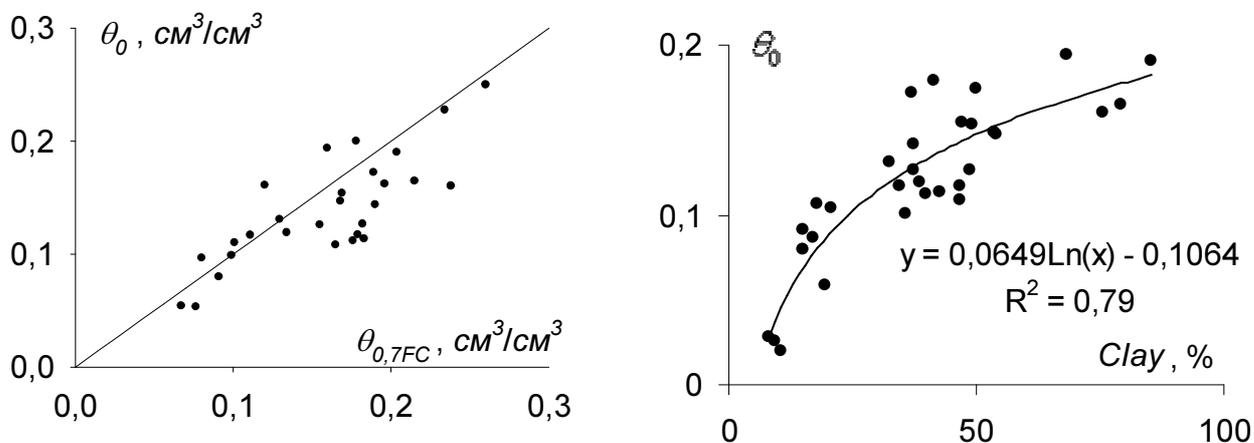


Рис.2. Зависимость параметра θ_0 от величины $ВРК=0,7НВ$ и от содержания физ. глины.

Логарифмическая зависимость θ_0 от содержания физической глины является доказательством сделанного ранее вывода о более динамичном поведении кривых $\kappa(\theta)$ для почв легкого гранулометрического состава в сравнении с тяжелыми почвами (Макарычев, 1992).

Выявлено, что параметр a определяющий прирост температуропроводности с влажностью максимален для дерново-подзолистых почв засушливой степи. По мере приближения к предгорьям Алтая его значение уменьшается, что объясняется утяжелением гранулометрического состава и увеличением содержания органического вещества, когда в тонкодисперсных почвах вытеснение почвенного воздуха водой происходит постепенно и в результате процессов набухания органоминеральных частиц количество тупиковых и замкнутых пор становится больше чем в грубосперсных почвах. Также в каштановых почвах сухой степи изменение температуропроводности с ростом влажности происходит более динамично и в более узком диапазоне увлажнения, чем в средне и тяжелосуглинистых (глинистых) черноземах, что подтверждается уменьшением параметра b и увеличением θ_0 . В целом в почвах сухой степи

коэффициенты температуропроводности начинают увеличиваться, и достигают наибольшего значения при меньших влажностях, чем в почвах колючей степи, лесостепи и предгорий Алтая (Салаира). Изменение параметра κ_0 для различных почв по почвенно-климатическим зонам Алтайского края неоднозначно. Ранее С.В. Макарычевым (1992) было показано, что температуропроводность сухой почвы с утяжелением гранулометрического состава, её уплотнением и увеличением содержания органического вещества уменьшается. Нами выявлено, что дерново-подзолистые почвы засушливой степи имеют низкие значения κ_0 , несмотря на супесчаный гранулометрический состав, что можно объяснить повышенным уплотнением и низким содержанием органического вещества. В глинистых черноземах предгорий Алтая, имеющих такие же значения параметра κ_0 , наибольшее влияние, вероятно, оказал гранулометрический состав, в частности наличие тонкодисперсных фракций.

Полученные в результате аппроксимации параметры модели ОГХ ван Генухтена были сопоставлены с базовыми физическими свойствами. Выявлено, что больше всего на гидрофизические параметры влияют содержание физической глины, плотность сложения и удельная поверхность. Параметр θ_r нелинейно зависит от содержания физической глины по закону насыщения. При увеличении содержания частиц размером меньше 0,01 мм количество прочносвязанной влаги возрастает. Зависимость параметра θ_r от удельной поверхности S линейная, прямопропорциональная, что связано с увеличением адсорбируемой влаги с увеличением удельной поверхности. Параметр θ_s закономерно уменьшается при увеличении плотности почвы в связи с уменьшением объема влагоудерживающих пор. С увеличением содержания физической глины коэффициент α уменьшается. С помощью динамического метода амплитудной развертки установлена тесная взаимосвязь предела текучести и интегральной величины Z с содержанием органического вещества и капиллярно-сорбционного давления влаги.

Глава 6. Моделирование гидротермического состояния почв

При математическом моделировании гидротермического режима в почве необходимо знать функцию температуропроводности, ОГХ и ФВ которые зависят от ряда физических свойств почвы.

Для расчета температуропроводности почвы нами предложен метод, в основе которого положена электротепловая аналогия в сочетании с теорией сигналов в радиотехнике. При этом почва рассматривается как фильтр нижних частот (ФНЧ), изменяющий энергетический (амплитудный) спектр исходной функции, которую предлагается разложить на элементарные гармоники с разными частотами с помощью преобразования Фурье. В данном случае преобразование Фурье используется как амплитудно-частотная декомпозиция сигнала, то есть обратимый переход от временного пространства в частотное. Получена расчетная формула для определения коэффициента температуропроводности: $\kappa = 2\pi h^2 f_c$, где h – толщина рассматриваемого слоя, m ; f_c – частота среза (пропускания), c^{-1} , определяемая как значение частоты при максимальной спектральной плотности. Предложенный метод является альтернативой методу температурных волн для случая когда коэффициент температуропроводности необходимо рассчитать на относительно коротких промежутках времени, по сравнению с периодом колебания.

В работе была произведена функциональная проверка восстановления ОГХ по полученным: 1) региональным и 2) зональным параметрам 3) с учетом и 4) без учета изменения их по профилю, 5) с предварительной группировкой массива экспериментальных данных на классификационном уровне и 6) без нее.

Модель, воспроизводящая ОГХ по параметрам ван-Генухтена, была построена по обучающей выборке ($n=540$), составляющей 2/3 части от общего объема выборки ($n=810$). Точность прогноза на основании полученной модели оценивалась по тестовой выборке, составляющей 1/3 часть от общего объема выборки ($n=270$).

Среднеквадратичная относительная ошибка аппроксимации S рассчитывалась по формуле (Schaap, 2004; Шеин, Архангельская, 2006):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\theta_{расч_i} - \theta_{экс_i}}{\theta_{экс_i}} \right)^2}{n}},$$

где $\theta_{экс_i}$ и $\theta_{расч_i}$ – экспериментальные и вычисленные по модели значения объемной влажности, n – количество измерений.

Рассчитанные значения θ по уравнению ван Генухтена с использованием зональных профильных аппроксимационных параметров, с разделением по гранулометрическому составу, получены с ошибкой, изменяющейся от 3% до 12% для пахотных почв и от 15% до 32% для более переменных лесных почв. При описании ОГХ с помощью зональных параметров с группировкой данных по гранулометрическому составу, но без учета изменения их по профилю значения S несколько выше. При использовании коэффициентов *UNSODA* взятыми из *RETC* значения ошибок возрастают до 40%. Региональные параметры, без деления по гранулометрическому составу, не позволяют адекватно восстанавливать ОГХ. Наибольшие значения ошибок характерны для лесных песчаных и супесчаных почв, т.к. здесь сказывается значительное отклонение (уменьшение до 5 раз) присущих им параметров, от среднего по региону. В то время как для основных пахотных почв региональная ошибка составляет 30-40%, что близко к значениям ошибок расчета θ по параметрам из базы *UNSODA*. Группировка массива экспериментальных данных $\theta(P)$ по гранулометрическому составу на этапе получения региональных параметров привела к снижению ошибки до 6-19% для агропочв, что несколько выше ошибки расчета ОГХ с зональными параметрами, но ниже чем региональные значения без деления образцов по гранулометрическому составу.

Для восстановления ОГХ по базовым физическим свойствам использованы педотрансферные функции (ПТФ). В настоящей работе

применен функционально-параметрический метод, в котором регрессионные зависимости связывают параметры аппроксимации ОГХ с основными почвенными свойствами. В качестве предикторов выбраны: плотность сложения, гранулометрический состав, содержание органического углерода, а параметры модели ОГХ ван-Генухтена в качестве переменных отклика. В работе были получены «непрерывные» ПТФ с помощью множественной линейной регрессии (Шеин, 2005):

$$y_i = a_i + b_i \omega_{\text{песок}} + c_i \omega_{\text{пыль}} + d_i \omega_{\text{ил}} + e_i \omega_c + f_i \rho_b EKO$$

где y – искомые параметры аппроксимации модели ОГХ ван Генухтена, a, b, c, d, e, f, g – коэффициенты регрессии; $\omega_{\text{песок}}, \omega_{\text{пыль}}, \omega_{\text{ил}}, \omega_c$ – содержание в почве песка, пыли, ила и органического углерода соответственно; ρ_b – плотность почвы; EKO – емкость катионного обмена.

В данной работе были получены собственные непрерывные ПТФ для почв Алтайского края. Массив данных, состоял из 810 экспериментальных кривых водоудерживания с одновременным получением данных о гранулометрическом составе, плотности сложения и содержании органического вещества. ПТФ были построены также как и модель ОГХ: по обучающей выборке, составляющей 2/3 части от общего объема выборки, точность прогноза оценивалась по тестовой выборке, составляющей 1/3 часть от общего объема выборки.

Для создания математической модели, описывающей связь значений гидротермических параметров со значениями почвенных свойств, были использованы методы множественной линейной и нелинейной регрессии (МЛР и МНР), а также метод искусственных нейронных сетей (ИНС). При этом с помощью программы *Neural Networks Statistica* были созданы собственные ИНС.

Анализ статистического распределения переменных предсказателей и переменных отклика проведен с помощью критерия χ^2 на основе проверки гипотезы о типе распределения (Мешалкина, Самсонова, 2008).

Всего было получено 17 различных ПТФ. Рассмотрим варианты, наиболее адекватно воспроизводящие гидрофизические параметры. Для параметра θ_r получено следующее регрессионное соотношение (ПТФ₃):

$$\theta_r = -0,046856 + 0,001346 \cdot FG + 0,001568 \cdot C_{org} + 0,041504 \cdot \rho$$

где, FG – содержание физической глины, C_{org} – содержание органического вещества, ρ – плотность сложения.

Зависимость $\theta_{r[расч]} = f(\theta_{r[эксн]})$ расчетных данных от экспериментальной выборки для ПТФ₃ показана на рисунке 3 с указанием среднеквадратичной относительной ошибки аппроксимации S .

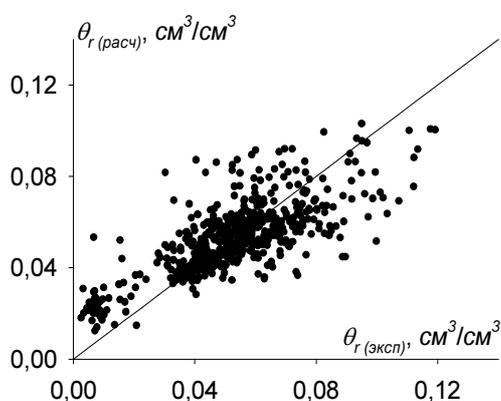


Рис.3. Корреляционное поле

$$\theta_{r[расч]} = f(\theta_{r[эксн]}).$$

$$S = 36\%$$

Добавление в регрессионное уравнение нелинейных функций преобразования не улучшило качество прогноза величины θ_r . В основе метода ИНС положена теорема о возможности аппроксимации любой функции многих переменных при использовании любой произвольной нелинейной функции нейронов (Kreinovich, 1991; Горбань А.Н., Россиев Д.А., 1996). Перед созданием нейросети массив сопряженных данных θ_r , θ_s , α , n с гидрофизическими характеристиками, а также с основными физическими свойствами почвы был разделен на обучающее множество, используемое для обучения сети и контрольное множество для проверки качества работы сети, которое не применялось в процессе обучения. На этапе создания сети был выбран тип задачи – регрессия, а тип входных и выходных элементов – непрерывные с построчным удалением отсутствующих значений, т.к. нейросеть чувствительна к пропускам данных. При выборе типа сети использовалась комбинация: линейная, нелинейная, радиальная базисная функция и трехслойный персептрон с дальнейшим выбором лучших сетей. Сложность сети определялась числом скрытых элементов: в

радиально-базисной функции от 1 до 138; числом слоев (от 1 до 10) в многослойном персептроне, моделирующего функцию отклика с помощью функций «сигмоидных склонов». Длительность анализа была ограничена 10 сетями. Критерий отбора сети из всего множества созданных сетей определялся наименьшей ошибкой на контрольной выборке, которая не превышала 12%, а в большинстве случаев составляла не более 5%. В процессе работы сравнение нескольких сетей показало, что по мере увеличения числа элементов на скрытом слое сети растет точность результатов. Созданные сети успешно распознали структуру обучающего множества и пригодны для использования в прогнозировании значений параметров модели ОГХ ван Генухтена. Модели сохранены в файлах формата языка программирования *Си*, и готовы к интеграции с другими приложениями.

Нейросеть также как и регрессия занижает расчетные значения θ_r по сравнению с наблюдаемыми для тяжелосуглинистых и легкоглинистых почв. В отличие от регрессии нейросеть (ПТФ₅) более точно воспроизвела θ_r песчаных почв. Обучение ИНС на почвенных образцах отдельно взятой климатической зоны (колочной лесостепи) улучшило точность прогноза (рис.4.).

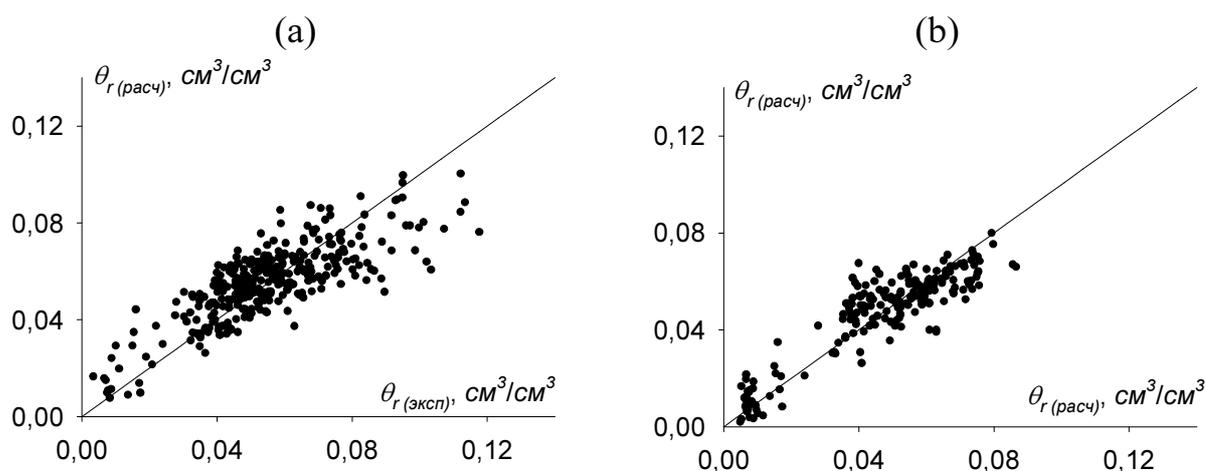


Рис.4. Корреляционное поле $\theta_{r[расч]} = f(\theta_{r[эксн]})$ для ИНС: (а) – все почвенно-климатические зоны, $S = 21\%$; (б) – колочная лесостепь, $S = 18\%$

Для параметров θ_s (рис.5) и α получены следующие регрессионные соотношения:

$$\theta_s = 0,813746 + 0,000620 \cdot FG + 0,001677 \cdot C_{org} - 0,264901 \cdot \rho$$

$$\alpha = 0,137885 - 0,018987 \cdot \ln(FG) - 0,008473 \cdot C_{org}^{1/2} - 0,036163 \cdot \rho$$

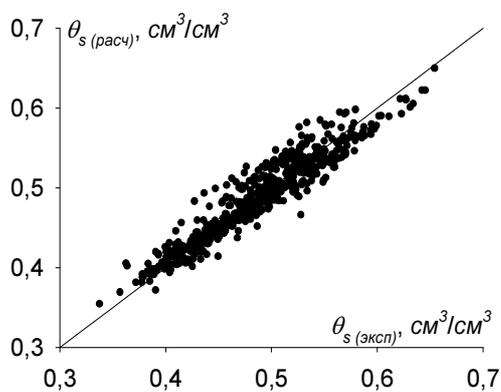


Рис.5. Корреляционное поле

$$\theta_{s[\text{расч}]} = f(\theta_{s[\text{эксп}]}) \text{ МЛР.}$$

$$S = 3\%$$

В нейросетевых ПТФ наилучшие результаты показал вариант со следующими входными параметрами: содержание песчаной фракции, крупной пыли, физической глины, органического вещества и плотности. Практически все ПТФ, построенные на ИНС имели большее количество входных параметров, чем регрессионные ПТФ.

Для грубодисперсных почв ПТФ метода МЛР занижала α , что связано с нелинейной зависимостью данного гидрофизического параметра от основных свойств почвы и неспособностью описать данные зависимости с помощью линейной регрессии ($S=60\%$). Применение методов МНР и ИНС позволило снизить погрешность расчета параметра α до 42% и 39% соответственно (рис.6).

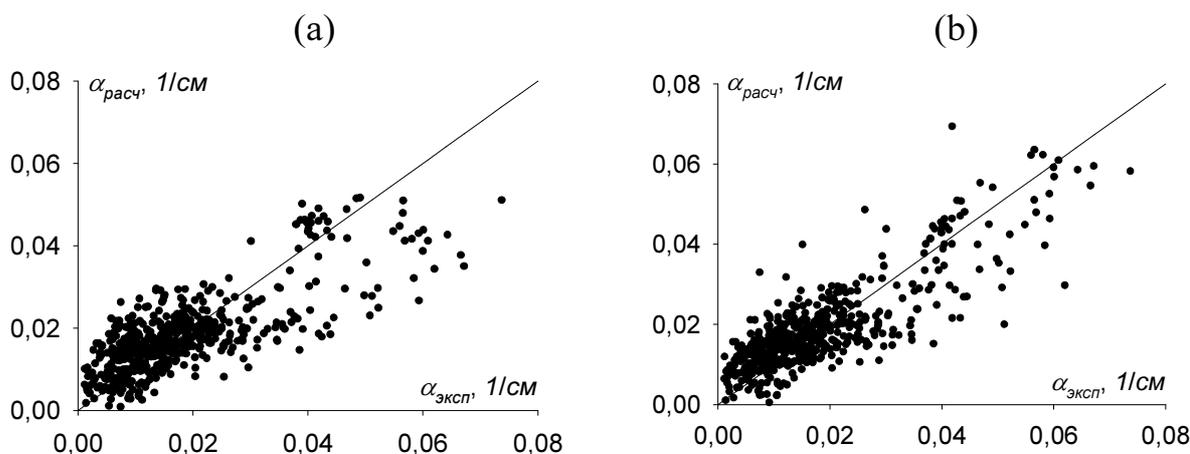


Рис.6. Корреляционное поле $\alpha_{[\text{расч}]} = f(\alpha_{[\text{эксп}]})$: (а) – МНР; (б) – ИНС.

Из регрессионных способов для параметра n наилучший вариант, также как и для α , получен методом нелинейной множественной регрессии:

$$n = 2,629161 - 0,439479 \cdot \ln(FG) + 0,034276 \cdot C_{org} + 0,508964 \cdot \rho$$

Для данного метода и метода ИНС погрешность расчета параметра n составила 7% и 6% (рис.7), в то время как для МЛР она равна 9%.

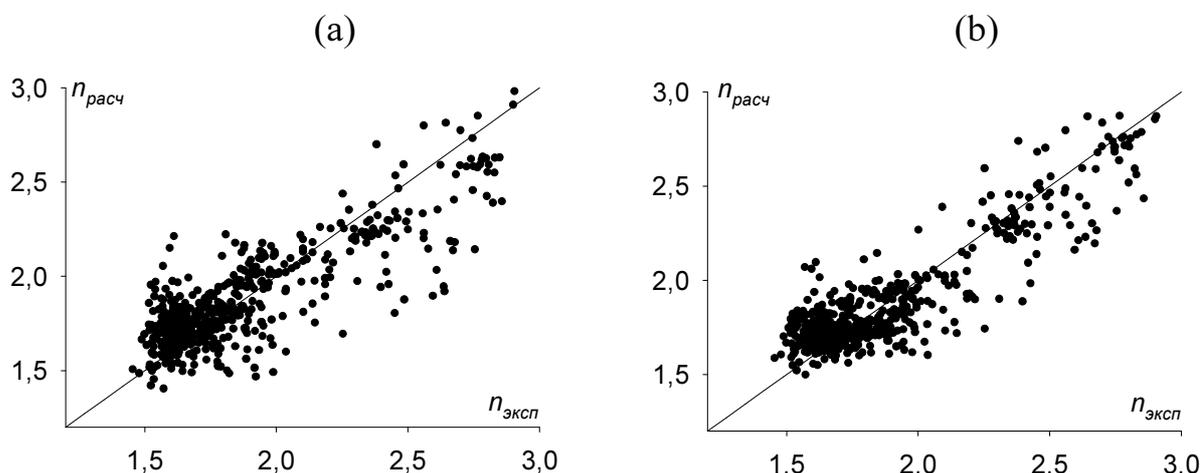


Рис.7. Корреляционное поле $\theta_{n[расч]} = f(\theta_{n[эксп]})$: (a) – МЛР, (b) – ИНС.

Для построения ИНС (расчет n) использованы следующие входные параметры: содержание, крупной пыли, физической глины, органического вещества и плотность. ПТФ для параметра K_s представлена нелинейным регрессионным уравнением:

$$K_s = 271,293 + 0,179 \cdot Sand - 111,716 \cdot \ln(FG) + (\rho / 267,203) \quad (5)$$

Погрешность расчета K_s составила 30% и 26% для МЛР и ИНС соответственно (рис.8).

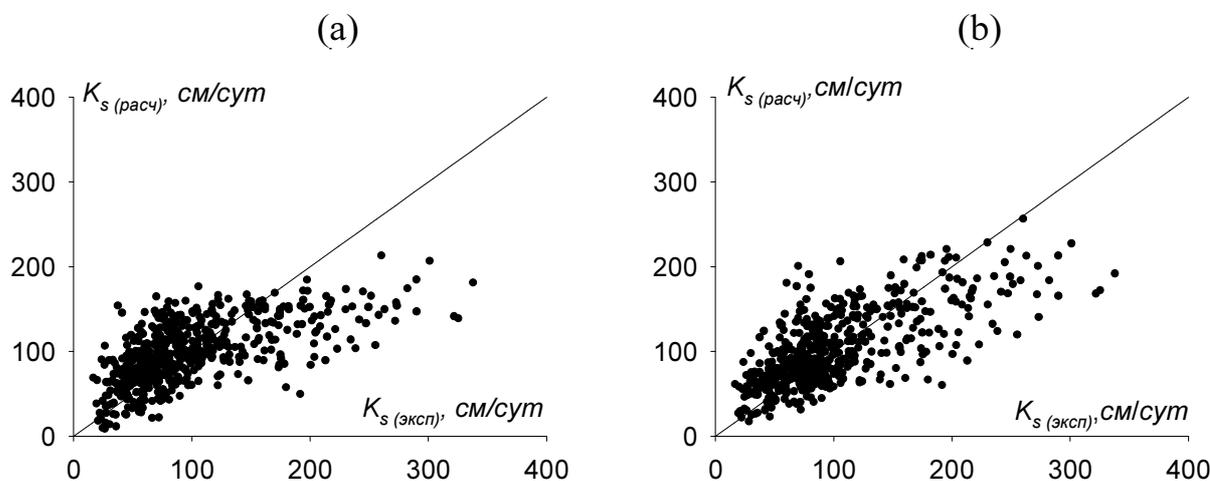


Рис.8. Корреляционное поле $\theta_{K_s[расч]} = f(\theta_{K_s[эксп]})$. (a) – МЛР, (b) – ИНС.

На входе ИНС (K_s) использованы данные по содержанию песчаной фракции, физической глины и плотности.

В работе показано, что наибольший вклад в регрессию гидрофизических параметров модели ОГХ ван Генухтена для почв Алтайского края вносит содержание физической глины, плотность сложения и содержание органического вещества. Так для параметра θ_r в порядке значимости располагаются предикторы: содержание физической глины → плотность сложения; для θ_s плотность сложения → содержание физической глины; для α содержание физической глины → плотность сложения и содержание органического вещества имеют практически одинаковое влияние на данный параметр; для n содержание физической глины → плотность сложения → содержание органического вещества; для K_s содержание физической глины → плотность сложения.

Также с помощью проверки свойства нулевого среднего установлено, что оно было близко к нулю во всех рассмотренных случаях, поэтому предложенные ПТФ не содержат постоянной систематической ошибки и адекватны по критерию нулевого среднего. Проверка адекватности в совокупности с проверкой случайности ряда остатков произведенной по методу серий и проверкой значимости по критерию Фишера показала, что предложенные ПТФ являются статистически значимыми и могут быть приняты для использования в прогнозировании гидротермических параметров почвы.

Для выявления степени влияния различных факторов на гидротермический режим в почве и оценки его погрешности расчета была проведена функциональная проверка полученных значений гидротермических параметров и свойств с помощью численного моделирования в программной среде *Hydrus*. Для этого были экспериментально получены значения влажности черноземов легко- и среднесуглинистых в течение вегетационного периода. Для данных разновидностей почв влажность и температура являются критическими

факторами. Рассмотрены различные краевые (начальные и граничные) условия, при этом выявлено влияние неточности задания входных параметров на гидротермический режим. Все многообразие возможных краевых условий группировалось по способу их получения: 1) экспериментальное обеспечение входных параметров, полученное в результате полевых и лабораторных исследований, 2) экспериментально-расчетное обеспечение входных параметров, полученное в виде срочных наблюдений с действующих метеорологических станций.

Для оценки погрешности расчета режима влажности первой группы краевых условий были выбраны: начальное условие в виде экспериментального профильного распределения объемной влажности (капиллярно-сорбционного давления) почвы; верхнее и нижнее граничные условия в виде изменяющихся и постоянных экспериментальных значений объемной влажности, давления, потока с различным шагом опробования; нижнее граничное условие задавалось в виде свободного стока. Гидрофизические функции определялись с помощью модели одинарной пористости ван Генухтена (1980) с входными зональными параметрами этой модели, полученные с помощью процедуры аппроксимации экспериментальных ОГХ с разделением по гранулометрическому составу.

Анализ статистик различий между расчетными и экспериментальными данными значений объемной влажности почвы, а также значений относительной среднеквадратичной ошибки показал, что наиболее точно *Hydrus* воспроизводит динамику влажности при верхнем и нижнем граничных условиях полученных из экспериментальных значений влажности почвы. При этом шаг (частота) выборки экспериментальных значений граничных условий для схемы расчета режима влажности в течение вегетационного периода должен составлять не более 10 суток (рис. 9).

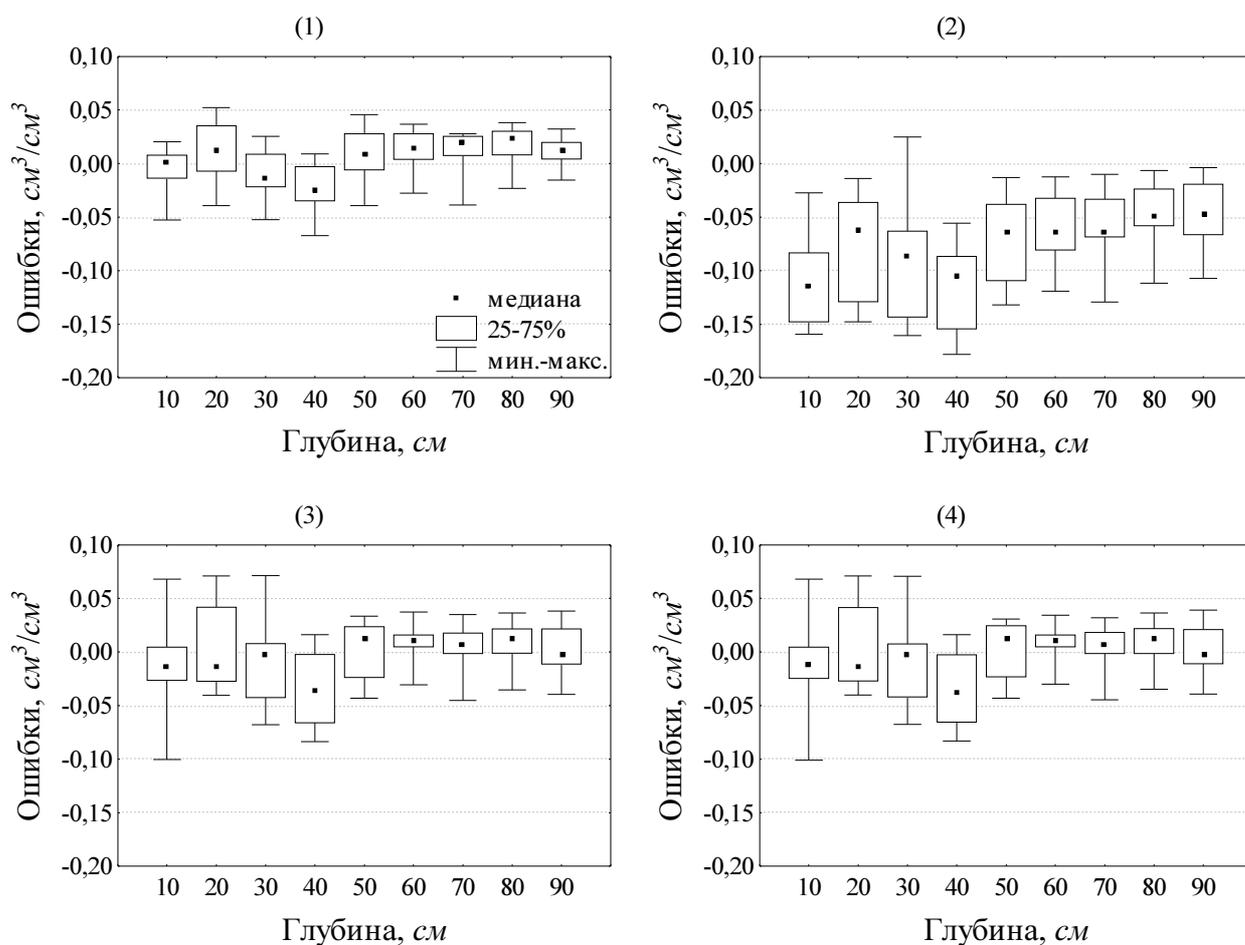


Рис.9. Статистики различий между расчетными и экспериментальными данными влажности почвы за вегетационный период: 1) – Число слоев $n=10$; параметры модели ОГХ ван-Генухтена – зональные; верхнее и нижнее ГУ – экспериментальные значения, шаг 1 сут. 2) Верхнее и нижнее ГУ – постоянные. 3) Атмосферное верхнее ГУ – Пенмана-Монтейта. 4) Верхнее ГУ ($n.3$), НУ соответствует НВ.

Для минимизации полевых работ по экспериментальному обеспечению входных параметров модели в качестве верхнего граничного условия были использованы метеорологические данные с ближайшей метеостанции. Для оценки погрешности расчета режима влажности были проведено численное моделирование с различными экспериментально-расчетными вариантами задания краевых условий: начальное условие 1) экспериментально определенное профильное распределение объемной влажности, 2) значения влажности соответствующие наименьшей влагоемкости в момент времени схода снега в весенний период; верхнее граничное условие рассчитывалось по метеоданным с эвапотранспирацией, рассчитанной по формулам 1) Пенмана-Монтейта, 2) Пенмана-Монтейта со встроенным погодным

генератором *Hydrus*, 3) Харгривза; нижнее граничное условие задавалось в виде свободного стока, как наиболее точное после экспериментально задаваемых значений. В результате проведенных численных экспериментов было выявлено, что влагоперенос наиболее точно воспроизводит вариант модели с верхним граничным условием с использованием метеоданных с эвапотранспирацией, рассчитанной по формуле Пенмана-Монтейта с шагом 1 сутки для расчета режима влажности в течение вегетационного периода, $S_E=14\%$ (рис.10).

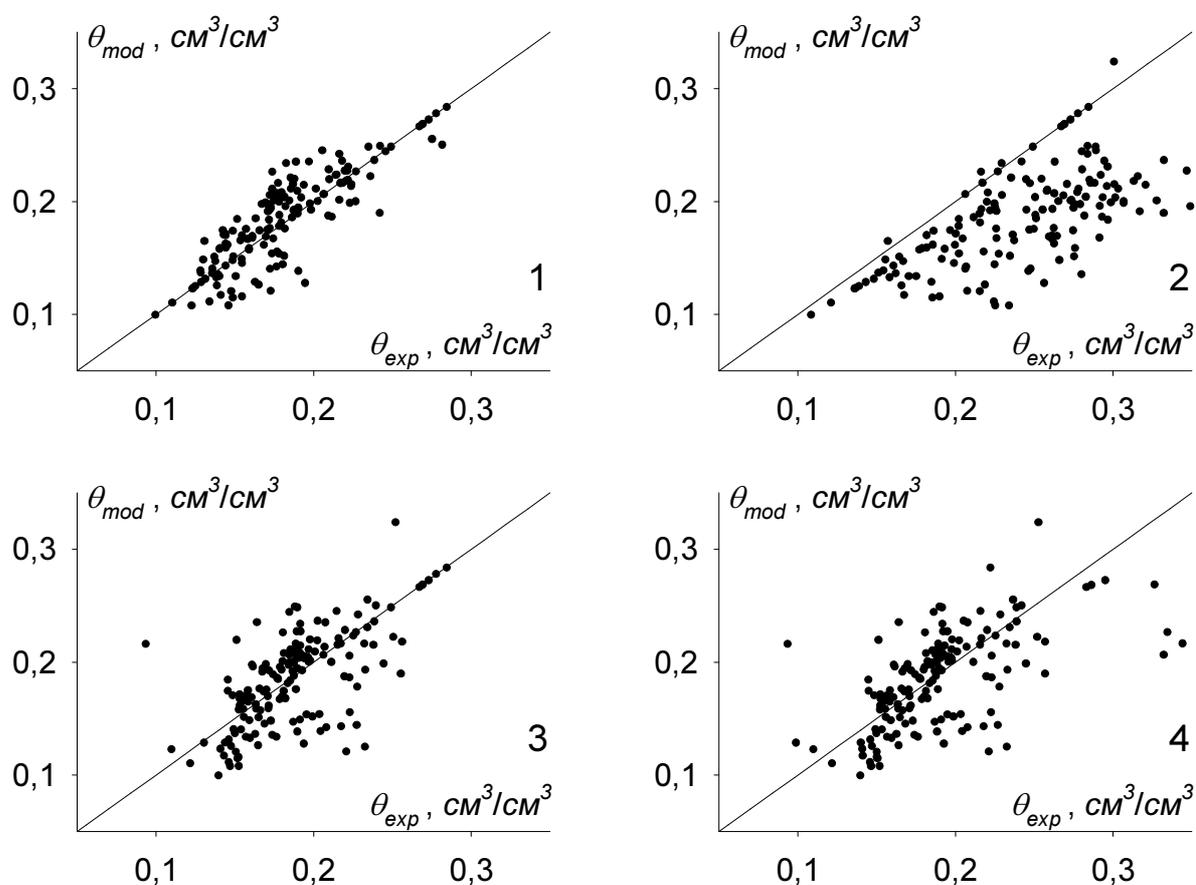


Рис.10. Корреляционные поля между расчетными и экспериментальными значениями влажности почвы. Обозначения на рис.9.

В работе было изучено влияние изменения краевых условий и гидрофизических параметров на погрешность расчета влагопереноса с целью оценки предъявляемой точности при определении этих характеристик. Для этого были проведены численные эксперименты с входными параметрами, изменяющимися в диапазоне от -50% до $+50\%$ относительно исходных значений и регистрацией погрешности расчета объемной влажности почвы.

Анализ зависимости относительной погрешности расчетной влажности почвы от изменения входных параметров показал, что погрешность расчета менее всего зависит от изменения начального условия и параметра K_s . Для граничных условий и параметра θ_r эта зависимость несколько выше. Наиболее высокие требования к точности задания входных величин должны предъявляться к параметрам модели ОГХ ван Генухтена n , θ_s и α , т.к. при вариации этих параметров погрешность расчета наибольшая (рис.11).

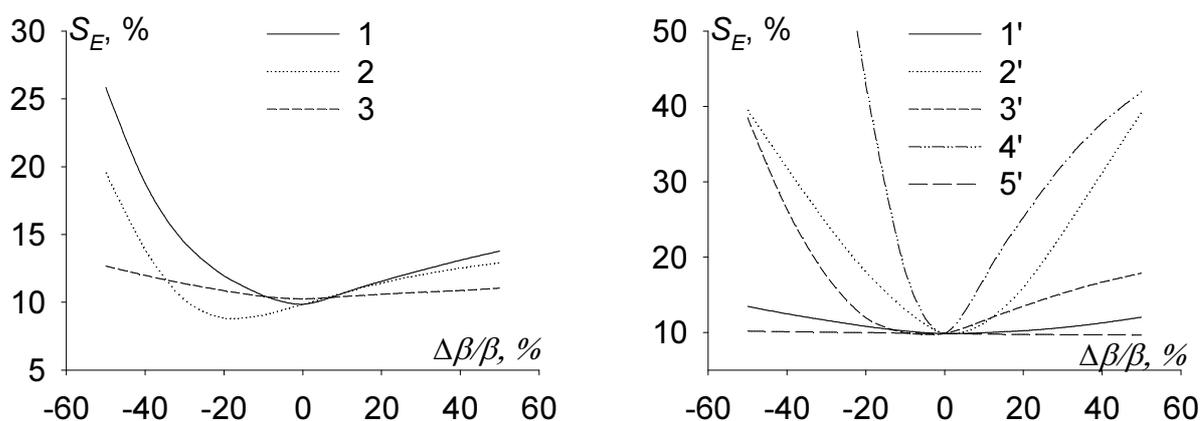


Рис.11. Зависимость относительной погрешности расчета влажности чернозема выщелоченного среднесуглинистого (S_E) от изменения крайних условий и гидрофизических параметров (β): 1 – верхнего граничного условия, 2 – нижнего граничного условия, 3 – начального условия; параметров модели ОГХ ван-Генухтена: 1' – θ_r , 2' – θ_s , 3' – α , 4' – n , 5' – K_s .

На рисунке видно, что зависимость $S_E = f(\Delta\beta/\beta)$ отображает диапазон адаптации модели, а также для рассмотренного случая, возможность адаптации модели по нижнему ГУ и параметру α . Уменьшение этих величин на 20% и 10% соответственно, снизило общую ошибку расчета до 7,8%. Критерием адаптации модели является необходимое и достаточное условие экстремумов (минимума) функции $S_E = f(\Delta\beta/\beta)$: $S'_E(\Delta\beta/\beta) = 0$, $S''_E(\Delta\beta_0/\beta_0) > 0$, где $\Delta\beta_0/\beta_0$ – стационарная точка.

Также была определена чувствительность модели влагопереноса к вариациям входных параметров. Для этого были использованы результаты проведенных численных экспериментов с входными параметрами, изменяющимися в диапазоне от -50% до $+50\%$ относительно исходных

значений и регистрацией изменений выходной функции (объемной влажности почвы): $\frac{\Delta y}{y_0} = S \frac{\Delta \beta}{\beta_0}$, где β_0 – выходная функция модели влагопереноса (объемная влажность почвы), $\Delta \beta_0$ – её изменение; y_0 – входные параметры модели влагопереноса (параметры модели ОГХ ван Генухтена) Δy – их изменение; S – коэффициент чувствительности модели влагопереноса.

Анализ величин коэффициента чувствительности от изменения входных параметров (рис.12) показал, что модель наименее чувствительна к изменению начального условия и параметра K_s . Для граничных условий и параметра θ_r чувствительность несколько выше. Наиболее высокие значения коэффициентов чувствительности соответствуют параметрам модели ОГХ ван Генухтена n , θ_s и α .



Рис. 12. Средние коэффициенты чувствительности (S) для входных параметров в диапазоне их изменения $\pm 50\%$.

На рисунке 13 показано уменьшение влияния начального условия с течением времени на погрешность расчета режима влажности, что является следствием того, что *Hydrus* является детерминистической моделью. На 11 сутки расчета это влияние полностью нивелируется. Для минимизации погрешности расчета режима влажности в течение вегетационного периода при использовании верхнего граничного условия 1-рода рекомендуется не превышать шаг по времени (частота выборки) более 10 суток.

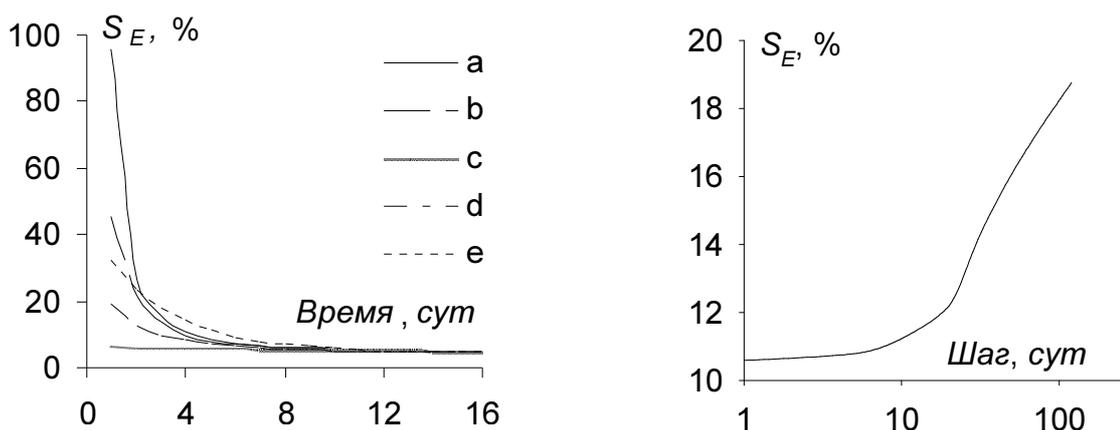


Рис.13. Зависимость относительной среднеквадратической погрешности (S_E) от времени при различных параметрах начального условия $\Delta\beta/\beta$ и от временного шага верхнего граничного условия 1-рода. $\Delta\beta/\beta$:
 а) – -90%, б) – -50%, в) – 0%, г) – +50%, д) – +90%.

В работе была проведена оценка влияния альбедо (A) на погрешность расчета влагопереноса. Для этого были проведены численные эксперименты с входными метеопараметрами и измененной величиной альбедо в диапазоне 5-30%, характерной для всех типов почв и агроландшафтов по А.Ф. Чудновскому (1976) (рис.14). Выявлено, что значение альбедо, равное 23%, которое рекомендовано ФАО и установленное по умолчанию в *Hydrus* для большинства сельскохозяйственных ландшафтов Алтайского края наименее всего вносит погрешность в расчет влагопереноса.

Вопросы моделирования температурного режима, а также постановка и решение различных задач теплопереноса в почвах достаточно подробно изучены (Чудновский, 1976; Horton, 1982; Juri et al., 1991; Макарычев, 1992; Царева, 2004; Михайлов, Шеин, 2010; Архангельская, 2012). Для расчета температурного режима почвы, в качестве верхнего граничного условия 1-го рода нами предлагается использовать данные дистанционного зондирования, полученные в результате спутниковой съемки. В качестве основного источника данных среднего разрешения использовались данные работающего на платформе спутника *TERRA (EOS AM-1)*. Для практической реализации граничного условия на поверхности 1-го рода нами был проведен подспутниковый эксперимент, заключающийся в измерении температуры

поверхности почвы в нескольких точках поля с дальнейшим усреднением этой величины. Наземные измерения проводились в моменты времени фактического пролета спутника (зонд *MODIS*). Соответствие между температурными данными дистанционного зондирования и наземными контактными измерениями показано на рис. 15.

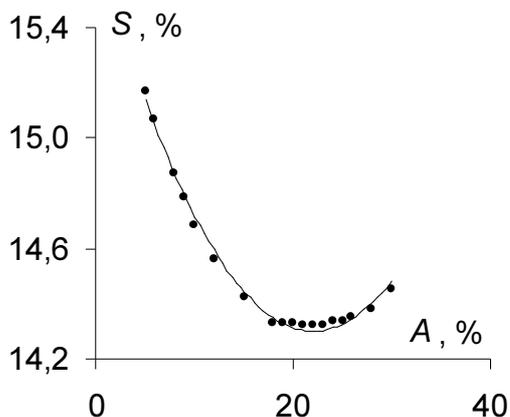


Рис.14. Зависимость относительной среднеквадратич. погрешности от величины альбедо (A).

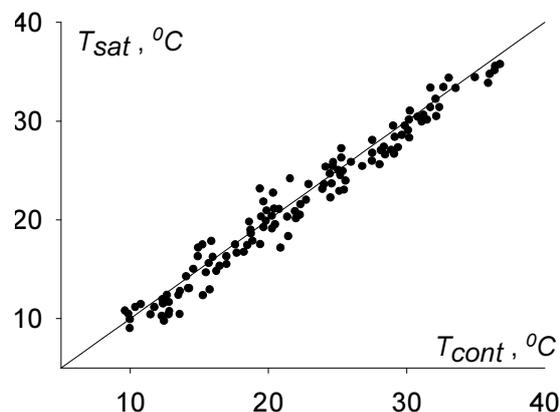


Рис.15. Соответствие между температурой поверхности почвы определенной с помощью спутниковых данных (T_{sat}) и наземными контактными измерениями (T_{cont}).

Сравнение зависимых выборок по критерию Вилкоксона показало, что они достоверно не различаются друг от друга ($T(121)=1934$, $p<0,01$). На рисунке видно, что между дистанционными и наземными данными существует тесная корреляция, поэтому для решения практических задач по моделированию температурного режима почв возможно использование спутниковых данных в качестве верхнего граничного условия.

В заключение отметим, что результаты проведенных исследований и созданная совокупность программно-аппаратных средств позволяет значительно расширить диапазон почвенно-гидротермических исследований. Для снижения доли инструментальных ресурсов измеряется состояние только верхнего слоя почвы, а необходимые данные о нижележащих горизонтах рассчитываются с помощью программных модулей математического моделирования с адаптацией параметров модели по имеющимся реперным инструментальным измерениям. Применение

конкретных программ моделирования, критерии адаптации модели, структура и элементы предлагаемой системы, а также гидротермические параметры почв Алтайского края отражены в настоящей работе.

Выводы

1. Подтверждена выявленная ранее закономерность зонального изменения физических свойств почв Алтайского края, заключающаяся в том, что по мере продвижения и изменения почвенного покрова от зоны сухой степи до предгорий Алтая и Салаира происходит уменьшение плотности почвы по всему профилю, увеличивается общая пористость, содержание органического вещества и мощность гумусового горизонта, снижается содержание песчаной фракции и возрастает доля пыли и ила.

2. Для почв Алтайского края гидрофизические параметры θ_r , θ_s и P_b модели ОГХ ван Генухтена, характеризующие влажность почвы соответствующей прочносвязанной влаге, полному влагонасыщению и давлению входа воздуха соответственно, увеличиваются при переходе от сухой степи до предгорий Алтая (Салаира). Параметр (n), характеризующий крутизну основной гидрофизической характеристики, максимален для почв зоны сухой степи и уменьшается для почв засушливой степи, колючей степи, лесостепи и предгорий Алтая и Салаира. Величина влагосодержания при максимальной температуропроводности в почвах сухой степи имеет меньшее значение, чем в почвах северных и северо-восточных территорий региона.

3. Наиболее адекватным экспериментальным обеспечением физически обоснованной модели влагопереноса в почвах Алтайского края является использование зональных профильных гидрофизических параметров, с предварительной группировкой массива экспериментальных данных по гранулометрическому составу.

4. Гидрофизические параметры почвы, восстановленные с помощью педотрансферных функций, получены с минимальной погрешностью методом искусственной нейронной сети по данным содержания

гранулометрических фракций, плотности сложения и содержания органического углерода в почве.

5. Для минимизации проводимой работы по экспериментальному обеспечению входных параметров модели влагопереноса для расчета режима влажности в течение вегетационного периода (150-180 *сут*) необходимо использовать в качестве верхнего граничного условия метеоданные с эвапотранспирацией, рассчитанной по формуле Пенмана-Монтейта с шагом 1 сутки. В качестве начальных условий можно задавать любые значения влажности (давления влаги) почвы, при этом влияние данных условий полностью нивелируется на 11 сутки расчета. При моделировании температурного режима почвы в пределах почвенно-климатической зоны или региона в качестве верхнего граничного условия 1-го рода необходимо использовать данные дистанционного зондирования, полученные в результате спутниковой съемки.

6. Разработанная инструментальная база, результаты и методика исследований являются перспективными средствами получения гидротермической информации почв в долговременном интервале, а также определения гидротермических параметров и состояния почв Алтайского края.

Список основных публикаций по теме диссертации

I. Монографии

1. Макарычев С.В., Мазиров М.А., Трофимов И.Т., **Болотов А.Г.**, Беховых Ю.В., Иванов А.Н., Лёвин А.А. Теплофизические свойства и режимы в антропогенно-нарушенных почвах: монография // М.: АНО «Редакция «Химия в сельском хозяйстве»», 2003. – 153 с.
2. Куприянов А.Н., Трофимов И.Т., Заблоцкий В.И., Макарычев С.В., **Болотов А.Г.** и др. Восстановление лесных экосистем после пожаров: монография // Кемерово: КРЭОО «ИРБИС», 2003. – 262 с.
3. Макарычев С.В., Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., **Болотов А.Г.**, Лёвин А.А., Сизов Е.Г., Иванов А.Н. Теплофизическое состояние почв Алтая в условиях антропогенеза: монография // Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 362 с.
4. **Болотов А.Г.**, Макарычев С.В. Гидрофизические свойства почв юго-востока Западной Сибири. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2015. – 129 с.

II. Статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов диссертационных работ

5. Макарычев С.В., **Болотов А.Г.**, Гефке И.В. Математическое моделирование температурного режима пахотного слоя чернозёма выщелоченного // Вестник АГАУ. – 2010. – № 5. – С. 26-28.
6. Макарычев С.В., Беховых Ю.В., **Болотов А.Г.** Система термостатирования для исследования теплофизических свойств почв // Вестник АГАУ. – 2010. – № 6. – С. 23-27.
7. **Болотов А.Г.**, Беховых Ю.В., Семенов Г.А. Определение теплофизических свойств капиллярно-пористых тел импульсным методом с использованием технологии визуального программирования // Вестник АГАУ. – 2010. – № 6. – С. 37-40.
8. Макарычев С.В., Беховых Ю.В., **Болотов А.Г.** Влияние рельефа на распределение теплофизических характеристик дерново-подзолистых почв засушливой степи Алтайского края // Вестник АГАУ. – 2010. – № 9. – С. 21-26.
9. Беховых Ю.В., Сизов Е.Г., **Болотов А.Г.** Характерные особенности теплофизических характеристик некоторых типов лесных почв Алтайского края // Вестник АГАУ. – 2011. – № 3. – С. 31-36.
10. Беховых Ю.В., Сизов Е.Г., **Болотов А.Г.** Режим влажности серых лесных почв Обь-Чумышского междуречья на вырубках березовых лесов // Вестник АГАУ. – 2011. – № 5. – С. 43-47.
11. Макарычев С.В., Беховых Ю.В., **Болотов А.Г.** Влагообеспеченность почв юго-западной части ленточных боров Алтайского края // Ползуновский вестник. – 2011. – № 4-2. – С. 80-83.
12. Макарычев С.В., Малиновских А.А., **Болотов А.Г.**, Беховых Ю.В. Послепожарные изменения почв и особенности флоры гарей равнинных сосновых лесов Алтайского края // Ползуновский вестник. – 2011. – № 4-2. – С. 107-110.

13. Беховых Ю.В., **Болотов А.Г.** Сравнительный анализ продуктивных запасов влаги дерново-подзолистых почв ленточных боров Алтайского края в зонах засушливой и сухой степи // Вестник АГАУ. – 2012. – № 2. – С. 42-46.
14. **Болотов А.Г.** Измерение температуры почвы с помощью технологии 1-Wire // Вестник АГАУ. – 2012. – № 11. – С. 29-30.
15. **Болотов А.Г.** Определение теплофизических свойств почв с использованием систем измерения ZETLab // Вестник АГАУ. – 2012. – № 12. – С. 48-50.
16. Гефке И.В., **Болотов А.Г.**, Бондаренко С.Ю. Моделирование температуропроводности в условиях сада // Вестник АГАУ. – 2012. – № 11. – С. 27-29.
17. **Болотов А.Г.**, Малиновских А.А., Шаталов А.Н. Накопление углерода в почвах Залесовского района Алтайского края // Вестник алтайской науки. – Барнаул: Изд-во КГУ Дом ученых Алтайского края. – 2013. – № 2-2. – С. 32-35.
18. Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., **Болотов А.Г.**, Сизов Е.Г. Физические свойства черноземов под хвойными лесополосами // Вестник АГАУ. – 2013. – № 9. – С. 23-27.
19. **Болотов А.Г.**, Карась Т.А., Лёвин А.А., Гефке И.В., Шаталов А.Н., Бутырин И.Н., Копыч Е.А. Измерение влажности почв методом частотной диэлькометрии // Вестник АГАУ. – 2013. – № 12. – С. 36-39.
20. Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., **Болотов А.Г.**, Сизов Е.Г. Влияние лиственных лесных насаждений на физические свойства почв // Вестник АГАУ. – 2014. – № 1. – С. 34-39.
21. **Болотов А.Г.**, Беховых Ю.В., Сизов Е.Г., Поскотинова О.Н. Физико-химические свойства черноземов под лиственными лесополосами // Вестник АГАУ. – 2014. – № 5. – С. 56-62.
22. Шеин Е.В., **Болотов А.Г.**, Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н. Реологические свойства черноземов Алтайского Приобья // Вестник АГАУ. – 2014. – № 8. – С. 32-38.
23. **Болотов А.Г.**, Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н. Основные гидрофизические характеристики каштановых почв сухой степи Алтайского края // Вестник АГАУ. – 2014. – № 9. – С. 36-41.
24. Макарычев С.В., **Болотов А.Г.**, Гефке И.В., Гончаров И.А., Гончаров Н.А. Основная гидрофизическая характеристика черноземов выщелоченных Алтайского Приобья в условиях сада // Вестник АГАУ. – 2014. – № 12. – С. 35-39.
25. **Болотов А.Г.**, Дубский С.Н., Шаталов А.Н., Шаталов А.Н., Бутырин И.Н., Кузнецов Е.Н., Гончаров И.А., Гончаров Н.А. Моделирование основной гидрофизической характеристики черноземов Алтайского края // Вестник АГАУ. – 2015. – № 2. – С. 31-35.
26. **Болотов А.Г.** Модифицированный метод подъема капиллярной каймы для определения контактного угла смачивания в почве // Вестник АГАУ. – 2015. – № 3. – С. 27-30.
27. Пастухов В.И., Макарычев С.В., **Болотов А.Г.** Основная

теплофизическая характеристика постпирогенных дерново-подзолистых почв северо-восточной части ленточных боров Алтайского края // Вестник АГАУ. – 2015. – № 3. – С. 31-34.

28. **Болотов А.Г.**, Макарычев С.В., Пастухов В.И. Моделирование основной теплофизической характеристики постпирогенных дерново-подзолистых почв северо-восточной части ленточных боров Алтайского края // Вестник АГАУ. – 2015. – № 4. – С. 27-30.

29. Гончаров И.А., **Болотов А.Г.**, Гончаров Н.А. Функции влагопроводности черноземов выщелоченных Алтайского Приобья // Вестник АГАУ. – 2015. – № 4. – С. 30-34.

30. Макарычев С.В., **Болотов А.Г.**, Гончаров И.А. Сезонная динамика коэффициента влагопроводности чернозема выщелоченного в садах Алтайского Приобья // Вестник АГАУ. – 2015. – № 5. – С. 47-52.

31. Гончаров И.А., Макарычев С.В., **Болотов А.Г.** Формирование режима влажности чернозема под ягодными культурами в условиях Алтайского Приобья // Вестник АГАУ. – 2015. – № 7. – С. 46-51.

32. **Болотов А.Г.** Метод определения температуропроводности // Вестник АГАУ. – 2015. – № 7. – С. 74-79.

33. **Болотов А.Г.**, Гончаров Н.А. Продуктивные влагозапасы черноземов Алтайского Приобья в условиях плодового сада // Вестник АГАУ. – 2015. – № 10. – С. 41-44.

34. Макарычев С.В., **Болотов А.Г.** К вопросу о моделировании продуктивности жимолости в зависимости от почвенно-климатических факторов и гидрофизических свойств почвы // Вестник АГАУ. – 2015. – № 12. – С. 52-56.

35. Макарычев С.В., **Болотов А.Г.**, Гефке И.В., Изменение капиллярно-сорбционного давления в черноземе выщелоченном под ягодными культурами // Вестник АГАУ. – 2016. – № 1. – С. 54-60.

36. Макарычев С.В., **Болотов А.Г.** Моделирование теплофизических функций почв Алтайского края // Вестник АГАУ. – 2016. – № 7. – С. 26-32.

37. **Болотов А.Г.**, Макарычев С.В. Параметризация основной теплофизической характеристики почв Алтайского края // Вестник АГАУ. – 2016. – № 7. – С. 32-37.

III. Публикации в журналах, продолжающихся изданиях и сборниках

38. **Болотов А.Г.**, Макарычев С.В., Беховых Ю.В., Сизов Е.Г. Электронный измеритель температуры почвы // Проблемы природопользования на Алтае: сб. науч. тр. / АГАУ. – Барнаул: ООО «Принт-Инфо», 2001. – С. 55-57.

39. **Болотов А.Г.** Измерение температуры почв в полевых условиях // Антропогенное воздействие на лесные экосистемы: тез. докл. II Междунар. конф. (18-19 апреля 2002 г., Барнаул). – Барнаул: Изд-во АГУ, 2002. – С. 148-150.

40. **Болотов А.Г.**, Макарычев С.В., Левин А.А. Автоматизированная система для исследования теплофизических характеристик почв // Вестник АГАУ. – 2002. – № 3. – С. 20-22.

41. **Болотов А.Г.**, Лёвин А.А., Макарычев С.В., Беховых Ю.В. Устройство для определения теплофизических характеристик почв в полевых условиях // Патент 2241980 РФ МПК G 01 N 25/18 / Болотов А.Г., Лёвин А.А., Макарычев С.В., Беховых Ю.В., заявитель и патентообладатель Болотов А.Г. – № 2003108101/28; заявл. 24.03.03; опубл.10.12.2004, бюл. № 34.
42. Левин А.А., Макарычев С.В., **Болотов А.Г.** Особенности формирования температурного режима чернозема выщелоченного под жимолостью в зимний период // Проблемы рационального природопользования в Алтайском крае: сб. науч. тр. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2005. – С. 130-134.
43. **Болотов А.Г.**, Макарычев С.В., Левин А.А. Применение цифровых датчиков при измерении температуры почв // Проблемы рационального природопользования в Алтайском крае: сб. науч. тр. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2005. – С. 159-161.
44. **Болотов А.Г.**, Дианов Я.О. Формирование базы данных теплофизических характеристик почвы // Проблемы рационального природопользования в Алтайском крае: сб. науч. тр. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2005. – С.162-169.
45. Беховых Ю.В., **Болотов А.Г.**, Сизов Е.Г. Физические и теплофизические свойства дерново-подзолистых почв ленточных боров Алтайского края в зоне засушливой степи // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. статей IV Междунар. науч.-практ. конф. (5-6 февраля 2009 г.): в 3 кн. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2009. – Кн. 2. – С. 237-241.
46. Макарычев С.В., **Болотов А.Г.**, Гефке И.В., Шаталов А.Н. Теплофизические свойства черноземов выщелоченных Алтайского Приобья и их математические модели // Вестник алтайской науки. – Барнаул: Изд-во КГУ Дом ученых Алтайского края. – 2010. – № 1. С. 95-100.
47. **Болотов А.Г.**, Макарычев С.В. Применение автогенераторного преобразователя при измерении влажности почвы // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. статей VI Междунар. науч.-практ. конф. (3-4 февраля 2011 г.): в 3 кн. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2011. – Кн. 2. – С. 36-38.
48. Гефке И.В., Бондаренко С.Ю., **Болотов А.Г.** Гидротермический режим и теплофизические коэффициенты почвы яблоневого сада // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. статей VI Междунар. науч.-практ. конф. (3-4 февраля 2011 г.): в 3 кн. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2011. – Кн. 2. – С. 65-68.
49. **Болотов А.Г.**, Гефке И.В. Влияние климата на среднегодовую температуру почвы Алтайского края // Устойчивое развитие АПК: рациональное природопользование и инновации: материалы I Междунар. заочн. научно-практич. конф. (17 мая 2011 г.). – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. – С. 68-70.
50. **Болотов А.Г.** Многоточечная система мониторинга температуры почвы // Проблемы и перспективы инновационного развития мирового сельского хозяйства: материалы II Междунар. науч.-практич. конф. / под ред. И.Л. Воротникова. – Саратов: Изд-во «Кубик», 2011. – С. 196-197.
51. Malinovskikh A.A., **Bolotov A.G.** Features of post-fire succession course in the ob river pine forests of the Altai region // Journal of agricultural sciences: Mongolian Academy of Agricultural Sciences, 2012. – Vol.8(01) – P. 96-99.

52. Shishkin A.V., Gefke I.V., **Bolotov A.G.** Features of snow accumulation and soil temperature regime under sea-buckthorn plantings in winter period // Journal of agricultural sciences: Mongolian Academy of Agricultural Sciences, 2012. – Vol.8(01) – P. 109-113.
53. **Болотов А.Г.**, Шорина И.В. Моделирование теплофизических свойств черноземов выщелоченных на склонах Алтайского Приобья // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. статей VII Междунар. науч.-практ. конф. (2-3 февраля 2012 г.): в 3 кн. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2012. – Кн. 2. – С. 123-125.
54. **Болотов А.Г.**, Макарычев С.В., Гэфке И.В. Чувствительность модели температурного режима почв при изменении входных параметров в естественных условиях Алтайского края // Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования: мат. докл. VI съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (13-18 августа 2012 г., Петрозаводск). – Петрозаводск: Изд-во Карельский НЦ РАН, 2012. – Кн.1. – С. 151-152
55. **Болотов А.Г.**, Беховых Ю.В., Беховых Л.А., Поскотинова О.Н., Левин А.А. Исследование параметров теплогапереноса в почве с применением информационно-измерительных систем // «Перспективы развития научных исследований в 21 веке»: сб. мат. III Междунар. науч.-практ. конф., (г.Махачкала, 31 октября, 2013г.) – Махачкала: ООО «Апробация», 2013. – С. 92-94.
56. **Болотов А.Г.**, Шаталов А.Н., Бутырин И.Н., Гончаров И.А., Гончаров Н.А. Моделирование режима влажности почв // Современные научные исследования: инновации и опыт: сб. статей VII Междунар. науч.-практ. конф. (27-30 декабря 2014 г.): – Екатеринбург: Изд-во «Наука и образование», 2014. – С. 20-22.
57. **Болотов А.Г.**, Дубский С.Н., Кузнецов Е.Н., Шаталов А.Н., Бутырин И.Н. Чувствительность имитационной модели водного режима почв к краевым условиям // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. статей X Междунар. науч.-практ. конф. (4-5 февраля 2015 г.): в 3 кн. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2015. – Кн. 2. – С. 353-354.
58. **Болотов А.Г.** Многослойная численная модель температурного режима почвы // Инновационная наука. – Уфа: ООО «Аэтерна», 2015. – № 5. – С. 30-31.
59. **Болотов А.Г.** Методика измерения реологических свойств почвы с помощью реометра // Дальневосточный аграрный вестник. – 2015. – № 3. – С. 13-17.
60. Макарычев С.В., **Болотов А.Г.**, Гэфке И.В. Теплогаобеспеченность почвы плодового сада в условиях Алтайского Приобья // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тез. докл. VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (15-22 августа 2016 г., Белгород): в 2 ч. – Белгород: Изд-во Издательский дом «Белгород», 2016. – Ч.1. – С. 363-364.