УДК 631.001(082)

ФИЗИКО-АГРОНОМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАУЧНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МЕЛИОРАЦИЙ ЗЕМЕЛЬ

И. Б. Усков., Ю. Г. Янко

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт – Петербург, Гражданский пр., 14
E-mail: i.b.uskov@gmail.com

Поступила в редакцию 25 ноября 2016 г., принята к печати 09 декабря 2016 г.

Деятельность агрофизического института в общенаучном плане направлена на изучение фундаментальных закономерностей функционирования агроэкологических систем и разработку научных основ, методов и средств управления их продуктивностью и устойчивостью. Мелиорация природной составляющей агроландшафтов, улучшающая пролонгировано физические условия среды обитания, создает к тому же превентивную защиту от агрометеорологических рисков. В статье изложены логика, методология и основные этапы становления и развития физических исследований агрофизиков, обеспечивших сопровождение мелиоративных работ в земледелии. Показана фундаментальная основа развития балансовых подходов к формулированию научных гипотез большинства исследований, выполнявшихся различными научными школами агрофизиков, заложивших теоретические основы мелиоративной науки и практики.
Статья приурочена к 50-ти летию начала интенсивной мелиорации сельскохозяйственных земель Нечерноземной зоны Российской Федерации.
Ключевые слова: агроэкологические системы, агрофизика, мелиорация, научное обеспечение, логика развития.

PHYSICO-AGRONOMIC BASIS FOR SCIENTIFIC PROVISION OF COMPLEX MELIORATION

I. B. Uskov, Y. G. Yanko

Agrophysical Research Institute
195220, Saint Petersburg, Grazhdanskiy prospect 14
E-mail: i.b.uskov@gmail.com

The activity of the Agrophysical Research Institute in general scientific sense is aimed at cognition of fundamental consistent patterns of agroecological systems' functioning and developing scientific basis, methods and means for managing their productivity and sustainability. Soil melioration in agricultural landscapes, while improving soil physical conditions for crops, also creates preventive defense from agrometheorological risks. The paper describes logics, methodology and main developing stages of physical studies in agrophysics, which were providing supply for melioration in agriculture. Shown is the fundamental basis for developing balance approaches to formulating hypotheses for the majority of scientific studies carried out by different scientific schools of agrophysics. These works laid the theoretical basis for melioration science and practice. The paper timed to coincide with the 50th anniversary from the beginning of the intensive melioration of the Russian Federation non-chernozem agricultural lands.
Keywords: agroecological systems, agrophysics, melioration, scientific provision, logics of development.

ВВЕДЕНИЕ

Физико-агрономические исследования энерго- и массообмена в системе «почва-растения-атмосфера стали фундаментальной основой для разработки методов, приемов, технологий и технических средств контроля и управления продуктивностью и устойчивостью таких агроэкологических систем. Мелиорация является средством активного управления физическими парвметрами состояния среды обитания на оперативном и превентивном временных уровнях.

Исследованиями на основе детального изучения составляющих водного и теплового баланса почвы положено начало развитию работ по мелиорации почв и ирригации сельскохозяйственных полей. Разработанные на их основе рекомендации, методы расчета мелиоративных систем и методики их эксплуатации широко и успешно

используются в земледелии и растениеводстве, при осушительных мелиорациях и орошении. Созданы теоретические основы и развита гидрофизика почв. Получила строгое обоснование методика прогнозов регулирования водного режима почв, в том числе с использованием теории неравновесной термодинамики в исследованиях миграции воды и солей, а также трактовки и поведения влаги в почве с точки зрения классической теории капиллярности и энергетики существования воды в почве. Разработаны фундаментальные вопросы специфической отрасли агрофизики – физики и биофизики почв. Развиты: количественная теория процессов энергомассообмена на сельскохозяйственном поле и исследования по вопросам климатической обеспеченности урожаев в различных почвенно-климатических зонах России; методы математического моделирования для обеспечения оптимизации управления агротехнологиями; методы и технические средства получения информации о состоянии растений и среды их обитания.

В области теплофизики почв в течение ряда десятилетий был проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, в результате которых изучены основные закономерности и механизмы теплопередачи в почве. Многие приемы тепловой мелиорации и терморегуляции почв, нашли массовое применение в практическом земледелии.

Разработаны эффективные методы управления микроклиматическими ресурсами в пределах элементарной агроэкологической системы и почвенно-климатической зоны через изменение физических условий в среде обитания, т.е. созданы основы мелиоративной микроклиматологии.

Разработаны технические средства и приборы получения информации о параметрах состояния системы почва-растение-атмосфера и её структурных элементов.

Научное физико-агрономическое обеспечение комплексов мелиоративных работ, как будет показано в статье, имеет свою внутреннею логику развития и специфическую методологию, позволившую нескольким поколениям агрофизиков эффективно сотрудничать с проектировщиками, эксплуатационными и агрономическими службами.

ЭТАПЫ, ЛОГИКА И МЕТОДОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Созданы и развиты фундаментальные разделы специфической для научного сопровождения мелиоративных работ отраслей агрофизики: физики почв, гидрофизики и теплофизики почв, микроклиматологии. В их числе: теория и методы управления водным режимом сельскохозяйственных полей, разработанные в трудах исследователей школы член-корреспондента Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук (ВАСХНИЛ) С. В. Нерпина; теория и методы управления тепловым режимом почв и посевов, разработанные школой профессора А. Ф. Чудновского; теоретические основы управления микроклиматом сельскохозяйственных полей, развитые школой член-корреспондента Российской академии наук (РАН) И. Б. Ускова.

Благодаря работам Агрофизического института получила развитие важная отрасль агрофизической науки – гидрофизика почв. Исследования по гидрофизике были направлены на разработку количественной теории движения влаги в почве и методов оценки скоростей ее движения, процессов испарения, конденсации, транспирации и их регулирования, определения влагозапасов в почве, проблеме водообеспечения растений. В период, предшествовавший бурному развитию вычислительной техники, профессорами С. В. Нерпиным и М. К. Мельниковой (1967) были предложены уравнения движения жидкости в пористых телах под действием градиентов расклинивающего давления, электрического потенциала, температуры и осмотического давления; С. В. Нерпин развил представления о взаимодействии и равновесии стыковых и пленочных элементов почвенной влаги; ими совместно выполнены модельные исследования,

позволившие подтвердить экспериментом теоретические выводы.

Центральная проблема гидрофизики почв – степень связанности почвенной влаги с почвенными частицами, ее подвижность и доступность для растений, разработка мероприятий по регулированию водного режима почв путем механических обработок. Трактовка поведения влаги в почве с точки зрения классической теории капиллярности и пленочной формы существования воды в почве привела профессора Ф. Е. Колясева (Усков, 2002) к формулировке ныне широко известной теории дифференциальной влажности почв, элементами которой, являются: установление четырех различных механизмов движения воды в почве (гравитационного, капиллярного, пленочного и паро-диффузионного) в соответствии с её влажностью; установление физической природы «фронтального» движения связанной воды в почве; нахождение границ между механизмами, а также между водой свободной и связанной; установление влияния физических (влажность, плотность, температура) и химических факторов (осмотическое давление) на скорость передвижения воды в почве; установление влияния рыхления и уплотнения поверхности почвы на сохранение воды в почве.

В результате исследований П. В. Вершинина и И. Б. Ревута с сотрудниками (1972) показана агрономическая значимость разных степеней оструктуренности почвы. Было доказано, что макроструктура почвы является действенным регулятором физических и биологических процессов в почве, т.к. она характеризуется высокой пористостью (до 55–60%), большими размерами пор и меньшей плотностью по сравнению с микроагрегатной или бесструктурной почвами. Исследованиями института доказано, что такие почвы обладают более благоприятными для выращивания растений водными свойствами и воздушным режимом. Структурная почва является в термодинамическом смысле более совершенной системой, производство на ней требует меньших энергетических затрат, она более устойчива к разрушающему действию водной и ветровой эрозии.

В это же время профессор Б. Н. Мичурин (1975) разработал трехуровневую модель почвенной структуры и приложил капиллярную теорию подобия для оценки движения и равновесия почвенной влаги, развитую впоследствии Е. и Р. Миллерами. Он же указал на особое значение удельной поверхности почв в их водоудерживающей способности. Эти исследования обобщены в монографии «Энергетика почвенной влаги» (1975). Полученные им результаты сыграли существенную роль в понимании общих законов взаимодействия воды с почвой.

Профессором А. М. Глобусом (1983) выполнены исследования термопереноса почвенной влаги и неизотермического внутрипочвенного влагообмена. При этом был экспериментально обоснован гипотетический парожидкостный механизм термопереноса влаги в различных пористых средах и отмечены особенности миграции влаги при промерзании почв. В 60-е–70-е годы продолжалось интенсивное исследование неизотермического влагообмена в почвах, включая агрегированные, слоистые, неравномерно уплотненные и увлажненные почвы, в результате чего была создана математическая модель неизотермического влагообмена в закрытых системах и предложены преобразования подобия для таких систем.

На основе обширного экспериментального материала и развития теории в работах агрофизиков получила строгое обоснование методика прогнозов и регулирования водного режима почв, разработаны методы определения фильтрационных характеристик почв и грунтов. Проблемы строительства закрытого трубчатого дренажа на тяжелых суглинистых грунтах исследовались в лабораторных и полевых условиях (1998, 2009 гг.) учеными-мелиораторами СевНИИГИМ под руководством А. И. Климко и начальника Опытно-конструкторского бюро «Мелиорация» Янко Ю. Г. Исследования эффективности трубчатого и бесполосного дренажа в зоне

промерзающих почв выполнены научным коллективом член-корреспондента РАН В. И. Штыкова В эти же годы научное руководство тематикой по разработке рекомедаций по строительству мелиоративных систем осуществляли академик РАН Б. М. Кизяев и эксплуатации осушенных дренажом мелиорированных полей Г. Г. Гулюк

Почвенная гидрофизика лежит также в основе управления процессами поливов на орошаемых землях, где особенно важно контролировать динамику солевого режима и разрабатывать методы и приемы предотвращения вторичного засоления. Э. Айбасов и Н. Ф. Бондаренко (Усков, 2002) исследовали применимость электроосмоса для мелиорации солонцов. З. М. Петрова и Н. С. Остапенко (Усков, 2002) использовали принципы неравновесной термодинамики в исследованиях миграции воды и солей в глинах под действием таких термодинамических сил как градиенты электрического потенциала, концентрации (химического потенциала) и гидростатического напора. Агрофизики института постоянно вели исследования на орошаемых территориях, почвенно-климатические условия которых обуславливают риски засоления земель. Разработанные ими методические рекомендации широко и успешно используются в земледелии, при осушительных мелиорациях и ирригации в аридных и полуаридных зонах.

Учеными Северного научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации Д. Б. Циприсом и В. И. Ревутом исследован гидротермический режим поливных полей с использованием комплекса приборов, разработанных агрофизиками.

История почвенно-гидрофизических исследований – это во многом история разработки различных методов определения зависимости между влажностью (почв, растений) и химическим потенциалом воды. Каждый из немногочисленных принципов измерения этой зависимости (равновесие в вертикальных колонках и почвенном профиле над уровнем грунтовых вод, капилляриметры и тензиометры, мембранные и пластинные прессы) открывал новую эпоху в гидрофизике почв. Одним из таких принципов явилась микропсихрометрическая влагопотенциометрия. В Агрофизическом институте была разработана серия микропсихрометрических влагопотенциометров, основанных на эффекте Пельтье и датчиков к ним (Усков, 2002), которыми были снабжены научные учреждения России, Московский, Киевский и Ташкентский университеты, Государственный гидрогеологический институт, Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева и ряд научных учреждений стран ближнего зарубежья. С помощью этих приборов удалось не только провести многочисленные измерения основной гидрохимической характеристики почв (ОГХ) единым методом в недоступном ранее диапазоне потенциалов (7,0–0,1 кДж кг$^{-1}$), но и решить ряд теоретически важных задач, например, вопрос о ранее постулировавшейся аддитивности матричного и осмотического потенциалов в почве.

Тепловые мелиорации почв являются одной из составляющих мелиоративных работ. В области теплофизики почв в течение ряда десятилетий был проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, в результате которых изучены основные закономерности теплопереноса и предложены методы активного управления тепловым режимом почв и посевов (Куртенер, 1969). Определена роль механического и минералогического состава, плотности и влажности почвы в процессах теплопереноса. Разработаны оригинальные методы и технические средства исследования радиационного и теплового баланса деятельной поверхности и научнообоснованные приемы регулирования теплового баланса и температурного режима. Многие приемы тепловой мелиорации и терморегуляции почв, предложенные агрофизиками, нашли массовое применение в производстве.

В Агрофизическом институте целью исследований физических процессов на полях и в посевах явилась разработка

эффективных методов управления микроклиматическими ресурсами в пределах агроэкологической системы через изменение физических условий в среде обитания, т.е. мелиоративная микроклиматология. Исследования этого направления обобщены в монографии Д. А. Куртенера и И. Б. Ускова «Управление микроклиматом сельскохозяйственных полей» (1988) В агрофизике для решения задач управления микроклиматом сельскохозяйственных полей используется балансовый метод (Александров, Куртенер, 1935; Нерпин, Чудновский, 1967; Мушкин, 1971; Куртенер, Чудновский, 1979; Куртенер, Усков, 1988), балансовый метод является основным, обеспечивающим возможность эффективно управлять тепловым и водным режимами полей и посевов, целенаправленно изменяя отдельные составляющие теплового и водного балансов. Именно таким образом, возможно, поддерживать и обеспечивать необходимые для роста и развития посева тепло- и влагообеспеченность целостной системы «почва – растение – атмосфера», а не только отдельных её элементов. Исследованиями на основе детального изучения составляющих водного и теплового баланса почвы положено начало развитию работ по комплексной мелиорации почв. Важным результатом рассматриваемого направления явилось создание теплобалансографа для совместного исследования водного и теплового баланса, применяемого и в исследовательских целях при разработке методов измерения суммарного испарения сельскохозяйственного поля, при автоматизации систем орошения и назначении норм и сроков поливов.

Данные об интенсивности испарения с поверхности поля и растительного покрова или запасов влаги в почве, необходимых для управления водным режимом, предложено было получать не прямыми измерениями, а использованием метода теплового баланса. Такой подход связан с громоздкостью и сложностью выполнения комплекса необходимых измерений градиентов всех метеорологических параметров в полевых условиях. А. Ф. Чудновским (1967) разработан приближенный метод, в основе которого лежит расчет по фиксируемым значениям коротковолнового и длинноволнового баланса радиации, влажности и температуры воздуха, скорости ветра, суточного хода температуры воздуха и визуальной оценке влажности почвы. Одновременно О. Д. Рожанской (1956) разрабатывался метод с измерением распределения на поверхности поля всех приходных и расходных составляющих теплового баланса. Система измерений, включавшая пиранометр, аспирационные психрометры, термометры, почвенные термометры, шаровой зонд, электропсихрометры, термопары, штанговый термозонд, по радиационному балансу и тепловому потоку в почву, средней разности температур и влажности воздуха на двух высотах, позволила создать Ю. Л. Розеншток (1956) электронное измерительно-вычислительное устройство с автоматической регистрацией величины испарения с подстилающей поверхности. А. Ф. Чудновским (1962) предложено учитывать в качестве критерия интенсивности испарения в зависимости от метеорологических факторов отношение затрат тепла на испарение к расходу энергии на турбулентный перенос тепла и водяного пара. В полевых экспериментах И. Г. Мушкиным (1971) и М. Г. Санояном (1981) были исследованы возможности такой измерительно-вычислительной системы (теплобалансограф), оснащенной ПЭВМ; ими показано, что наиболее точным из существующих методов определения потоков тепла и водяного пара является метод теплового баланса. Измерения составляющих теплового баланса: поток тепла в почву, теплоотдачи в приземный воздух и испарения в суточных циклах ещё в 1953 году позволили М. А. Каганову и Е. П. Рябовой предложить методы оценки испаряемости, уточненные по данным наблюдений С. Л. Левина с использованием испарителей, на открытом пространстве и вблизи лесных полезащитных полос (Усков, 2002).

На величину одной из основных статей прихода (стока) тепла в почву, определяющей интенсивность энерго- и массообмена между приземным слоем

атмосферы (ветровым потоком) и почвой, оказывает рельеф поверхности поля. В. П. Кисловым в 1948 году и Е. П. Рябовой в 1959 году выполнены расчеты температурного режима для гребней симметричного треугольного сечения; особенность расчета заключается в учете потоков радиации. Иные подходы к вычислению теплового режима гребня были предложены в 1980 году П. Г. Романовым (Куртенер, 1988), использовавшим численное решение задачи Стефана для двумерной составной области с произвольной ступенчатой границей, и в 1982 году И. Б. Усковым (Куртенер, 1982), аппроксимировавшим форму гребней тригонометрической отображающей функцией. Полевыми наблюдениями Т. Е. Пащенко, Г. Г. Годун и О. Д. Рожанской в 1953 и 1957 годах (Усков, 2002) показана эффективность гребневания за счет улучшения теплового режима и специфики сезонной динамики температуры в гребнях. В комплексных полевых опытах среди лесных полос А. И. Куценко (Усков, 2002) исследовано высыхание почвы по горизонтам почвенного профиля. Экспериментами при продувке почвенных моделей гребней в аэродинамической трубе Л. В. Козыревой (Куртенер, 1988) выявлена эффективность использования агротехнического приема гребневания поверхности полей как средства управления водным режимом в различных погодных условиях; в тех же опытах доказана правомерность гипотезы С. В. Нерпина об образовании при определенных скоростях ветра и исходной влажности почвы тонкого пересохшего слоя у поверхности, выполняющего в последующем роль депрессора испарения.

Комплекс исследований теплофизиков и агрометеорологов Агрофизического института в период 1937–1975 годов по управлению водным режимом полей, выполненных с использованием метода теплового баланса и математических моделей процессов теплообмена в почве и средств тепловой мелиорации микроклимата, был обобщен в монографиях А. Ф. Чудновского и Д. А. Куртенера (1969, 1979). Оригинальное развитие балансового метода предложено А. И. Брежневым (Усков, 2002), создавшим модели процессов энерго- и массообмена в системе почва-растения-атмосфера на основе послойно-балансового динамического подхода, который в 1980–1984 годах был применен для моделирования совместного влаго– теплопереноса в ландшафтах агроэкосистем.

Начиная со второй половины 60-х годов, Агрофизический институт занимает передовые позиции в мировой науке по разработке и широкому использованию методов математического моделирования в земледелии, растениеводстве и мелиорации. Профессором Р. А. Полуэктовым (1980) создана оригинальная научная школа моделирования продукционного процесса и разработан комплекс имитационных динамические моделей агроэкологических систем. Профессором Н. И. Дружининым совместно с Э. Р. Антонс в 1973 году был разработан метод электро-гидравлической аналогии для моделирования в лабораторных условиях и прогнозирования загрязнения поверхностных вод суши. Исследования института по физике почв, включая математическое моделирование переноса тепла и влаги, были отражены в монографиях С. В. Нерпина и А. Ф. Чудновского (1967, 1975) и А. М. Глобуса (1983).

Развитие работ по математическому моделированию влагообмена в системе почва-растение-атмосфера выявило необходимость специфического информационного обеспечения. Это обстоятельство обусловило разработки новых приборов (Усков, 2002) для исследования физических свойств почв, а также отечественных аналогов той аппаратуры, которую нельзя было приобретать на Западе – укажем термопауки и термозонды для анализа профиля температуры и теплопроводности почв, «гранату» Колясева для измерения влажности почв, прибор П. В. Вершинина для определения водопрочности структуры, лабораторный прибор для измерения инфильтрации конструкции С. Л. Левина, теплобалансограф Ю. Л. Розенштока, широко используемые транзисторные термометры И. Б. Фогельсона, портативный

термовлагопотенциометр А. М. Глобуса и систему датчиков Л. Н. Степанова Ю. А. Зязева для наблюдения за режимом влажности почв в поле с помощью блоков электрического сопротивления и другие.

Для разработки и создания приборов и измерительных систем на основе агрофизических исследований в 1966 году было создано Специальное конструкторское бюро с экспериментальным производством Агрофизического института (СКБ с ЭП АФИ). Исследования и разработки научных подразделений сформировали новую отрасль приборостроения – агрофизическое приборостроение. Сотни образцов приборов и информационно-измерительных систем созданы для обеспечения исследовательских работ по агроэкологии, мелиорации почв, агрометеорологии, физиологии растений и биофизике. Агрофизические приборы и устройства выпускались мелкими сериями экспериментальным производством ирститута, а многие из них отечественной промышленностью. В течение многих лет институт координировал сельскохозяйственное приборостроение в стране, а в 90-ых годах был головной организацией Отраслевого научного комплекса по электронизации и научному приборостроению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные монографии, приведенные в хронологической последовательности, отражают логику развития научного обеспечения становления мелиоративных работ в России. Агрофизический институт создал фундаментальную основу для развития в России мелиоративной науки и практики и внес заметный вклад в международные исследования не только своими публикациями, но также организацией и проведением научных форумов с международным участием: «Исследование процессов обмена энергией и веществом в системе “почва – растение – приземный слой воздуха”» (1968), «Гидрофизические функции и влагометрия почв» (1987), «Измерительная и вычислительная техника в управлении производственными процессами в АПК» (1988), «Моделирование процессов и систем в отраслях АПК» (1993), «Микроклимат агроландшафтов» (1995).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров Б. П., Куртенер А. В. 1935. Физические основы теплового баланса почвы. М.-Л.: Сельхозиздат. 192 с.

Чудновский А. Ф. 1948. Физика теплообмена в почве. Л.: Гостехиздат. 220 с.

Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. 1967. Физика почв. М.: Наука. 583 с.

Куртенер Д. А., Чудновский А. Ф. 1969. Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте. Л.: Гидрометеоиздат. 299 с.

Мушкин И. Г. 1971. Влагообеспеченность сельскохозяйственных полей. Л.: Гидрометеоиздат. 256 с.

Ревут И.Б. 1972. Физика почв. Л.: Колос. 319 с.

Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. 1975. Энерго-и массообмен в системе растение-почва-воздух. Л.: Гидрометеоиздат. 358 с.

Мичурин Б. Н. 1975. Энергетика почвенной влаги. Л.: Гидрометеоиздат. 140 с.

Чудновский А. Ф. 1976. Теплофизика почв. М.: Наука. 352 с.

Куртенер Д. А., Чудновский А.Ф. 1979. Агрометеорологические основы тепловой мелиорации почв. Л.: Гидрометеоиздат. 231 с.

Полуэктов Р. А. 1980. Динамические модели экологических систем. Л., Гидрометеоиздат. 288 с.

Саноян М. Г. 1981. Агрометеорологические основы управления влагообеспеченностью посевов. Ереван: Айастэн. 371 с.

Куртенер Д. А., Усков И.Б. 1982. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте. Л.: Гидрометеоиздат. 231 с.

Платонов В. А. 1982. Оптимизация условий влагообеспеченности сельскохозяйственных культур. Л.: Гидрометеоиздат. 117 с.

Глобус А.М. 1983. Физика неизотермического внутрипочвенного влагообмена. Л.: Гидрометеоиздат. 279 с.

Куртенер Д. А., Усков И. Б. 1988. Управление микроклиматом сельскохозяйственных полей. Л.: Гидрометеоиздат. 263 с.

Агрофизика от А. Ф. Иоффе до наших дней / Под ред. И. Б. Ускова. СПб.: АФИ РАСХН, 2002. 358 с.