



**Агрофизический институт:
междисциплинарные и многопрофильные исследования
для практики земледелия и растениеводства (1932-2022)**

**90 ЛЕТ АГРОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
КАК ИСТОРИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ
И МИРОВОЙ АГРОФИЗИЧЕСКОЙ НАУКЕ**

И.Б. УСКОВ, В.П. ЯКУШЕВ, Ю.В. ЧЕСНОКОВ[✉]

Агрофизический научно-исследовательский институт (АФИ) был основан в 1932 году в составе Всероссийской академии сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина (ВАСХНИЛ) по инициативе академиков А.Ф. Иоффе и Н.И. Вавилова. В задачи проводимых исследований входило установление механизмов взаимодействия генотип—среда при воздействии абиотических факторов с целью управления продукционным процессом у сельскохозяйственных растений как в полевых, так и в контролируемых условиях произрастания. Молодая на тот момент агрофизическая наука, опираясь на достижения физики, математики и биологии, должна была обеспечить переход от описательной агрономии к науке, основанной на измерениях и расчетах факторов продуктивности, роста и развития растений и посевов, а также агроприемов, позволяющих управлять продукционным процессом и формированием урожая. Деятельность института направлена на познание фундаментальных закономерностей функционирования агроэкологических систем; разработку научных основ, методов и средств исследования физических, физико-химических, биологических и биофизических процессов в системе почва—растение—деятельный слой атмосферы; создание имитационных математических моделей этих процессов; разработку теоретических основ, методов и средств управления продуктивностью агроэкологических систем с целью повышения эффективности и устойчивости земледелия и растениеводства в природных и регулируемых условиях; разработку и создание технических средств получения информации о состоянии растений и сред их обитания. Агрофизический институт как ведущая научно-исследовательская организация реализует программы и проекты на основе агрономической физики и смежных с ней наук — агроэкологии, почвоведения, генетики, биофизики и физиологии растений, агроклиматологии, информатики, вычислительной математики, кибернетики и приборостроения. Успешно развиваются новые и междисциплинарные направления исследований, ориентированные на создание приемов эффективного управления процессами роста и развития, а также продуктивностью посевов посредством физических, физико-химических и других абиотических факторов воздействия на среду обитания растений.

Ключевые слова: агрофизика, физика почв, почвоведение, точное земледелие, факторы роста и развития растений, управление продуктивностью посевов.

Агрофизический научно-исследовательский институт (АФИ) был основан в 1932 году в составе Всероссийской академии сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина (ВАСХНИЛ) по инициативе академиков Абрама Федоровича Иоффе и Николая Ивановича Вавилова для развития новой в те годы отрасли естественных и агрономических наук — агрономической физики. В ее задачи входило установление механизмов взаимодействия генотипа с абиотическими факторами среды с целью управления продукционным процессом сельскохозяйственных растений в полевых и контролируемых условиях произрастания.

В учении Н.И. Вавилова взаимодействие генотип—среда заняло центральное место в формировании фенотипической и генотипической изменчивости хозяйственно ценных признаков и легло в основу классического закона гомологических рядов в наследственной изменчивости (1), главная ценность которого состоит в его прогностической сущности.

Н.И. Вавилов не раз указывал на наличие сортовых и генотипических различий у сельскохозяйственных растений по экологической пластичности, а также на необходимость изучать природу этих различий и управлять

ими с помощью абиотических факторов окружающей среды, прежде всего физического и физико-химического характера (2, 3). Именно поэтому он как Президент ВАСХНИЛ пригласил физика и выдающегося организатора науки академика А.Ф. Иоффе (1880-1960), который, будучи директором Физико-технического института АН СССР (ФТИ) в 1930-1931 годах, инициировал агрофизические исследования в ФТИ. Этот период совпал с образованием институтов в системе ВАСХНИЛ. В 1932 году А.Ф. Иоффе создал институт, решающий насущную для сельского хозяйства проблему повышения урожайности сельскохозяйственных культур за счет управления эколого-генетическими и физиолого-экологическими процессами формирования урожая. Основываясь на идеях Н.И. Вавилова, А.Ф. Иоффе выдвинул концепцию, согласно которой агрономическая физика (агрофизика), опираясь на достижения физики, математики и биологии, должна обеспечить переход от описательной агрономии к основанной на измерениях и расчетах науке об абиотических факторах, определяющих продуктивность, рост и развитие растений, и к разработке агроприемов для управления продукционным процессом и формированием урожая. На протяжении многих десятилетий А.Ф. Иоффе совершенствовал созданную им отрасль агрономической науки, превратившуюся в самостоятельное научное направление.

Агрофизика изучает физические, физико-химические и биофизические процессы в системе почва—растение—деятельный слой атмосферы и основные закономерности продукционного процесса, физические характеристики компонентов системы и сельскохозяйственной продукции. Разрабатываются научные основы, методы, технические и математические средства и агроприемы рационального использования природных ресурсов, повышения устойчивости агроэкосистем, земледелия и растениеводства. Это раздел междисциплинарной сельскохозяйственной науки, изучающий физические компоненты и структурно-функциональные закономерности их взаимодействия, а также взаимодействия генотипа и среды, сортовое разнообразие сельскохозяйственных культур применительно к агроценозам и агроландшафтам с целью агроэкологической оптимизации современных систем земледелия.

Результаты агрофизических исследований находят применение не только в растениеводстве и земледелии, но и в других фундаментальных и прикладных областях, например в животноводстве (регулируя температуру в коровнике, можно управлять молочной продуктивностью животных), микробиологии (абиотические факторы существенно влияют на процессы взаимодействия почвенной микрофлоры с ризосферой растений). Поэтому терминологически формулировка «взаимодействие генотип—среда» наиболее полно отражает предмет агрофизики как раздела современной сельскохозяйственной науки.

Этапы формирования этой новой области знаний, приоритетные достижения отечественной агрофизической школы, перспективы развития агрофизической науки и практического использования результатов исследований как основы наукоемких агротехнологий связаны с историей Агрофизического института и плеядой выдающихся отечественных ученых — физиков и агрофизиков: Г.М. Франка, В.П. Мальчевского, С.В. Нерпина, Ф.Е. Коляева, Б.С. Мошкова, Н.Ф. Бондаренко, А.М. Глобуса, И.Б. Ревута, А.Ф. Чудновского, И.Б. Ускова, А.В. Куртенера, В.А. Семенова, В.П. Якушева, Р.А. Полуэктова и многих других, внесших неоценимый вклад в создание и становление Агрофизического института.

Агрофизический институт: создание и становление.

Специфика территориальной застройки квартала южнее станции метро «Академическая» на северо-востоке г. Ленинграда (ныне г. Санкт-Петербург) по левую сторону от проспекта Науки заключается в создании многопрофильного учебно-научного комплекса, подобного Оксфордскому (г. Оксфорд, Великобритания) и Калифорнийскому (г. Лос-Анжелес, США). В этом районе сосредоточены научные и учебные организации. В центре комплекса находится Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, вокруг которого расположены Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ), Агрофизический (ранее Физико-агрономический) институт, Всероссийский НИИ гидротехники им. Б.Е. Веденеева, АО НИИ точной механики, Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Институт постоянного тока, Институт цитологии РАН, Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. Эти исследовательские институты и учебные заведения связаны между собой по многим направлениям. Выполняются совместные разработки и проекты, проводятся научные семинары, конференции и симпозиумы. В институтах функционируют филиалы кафедр университетов, студенты проходят практику и выполняют дипломные работы в лабораториях институтов, выпускники продолжают обучение в аспирантурах исследовательских институтов. Уникальные исследовательские стенды становятся межинститутской экспериментальной базой.

Большинство исследовательских институтов создавалось в 1930-е годы по инициативе ведущих профессоров Санкт-Петербургского политехнического университета и при их непосредственном участии. Агрофизический научно-исследовательский институт — ярчайший пример такого звена в научной кооперации. Директор Физико-технического института, он же декан физико-механического факультета Ленинградского политехнического института, А.Ф. Иоффе при поддержке Н.И. Вавилова выступил с инициативой по созданию такого института в системе ВАСХНИЛ.

В результате решением Коллегии Народного Комиссариата земледелия СССР от 5 января 1932 года и протоколом заседания Президиума ВАСХНИЛ от 7 января 1932 года был основан Физико-агрономический научно-исследовательский институт (ныне АФИ) в составе ВАСХНИЛ. АФИ был создан с использованием технологической базы Физико-технического института, для работы были привлечены сотрудники ФТИ и политехнического института.

А.Ф. Иоффе сформулировал исходную тематику работ института, соответствовавшую актуальным на то время проблемам. В основополагающих трудах А.Ф. Иоффе (4-6) были определены главные направления исследований в этой новой отрасли естественных наук.

Агрономическая физика как наука начала формироваться в конце XVIII века. В России ее основоположниками были крупные агрономы, почвоведы и климатологи. Начала основ современной агрофизики заложены в трудах В.В. Докучаева, К.А. Тимирязева, П.А. Костычева, А.А. Измаильского, В.Г. Ротмистрова, В.Р. Вильямса, А.И. Воейкова и Н.И. Вавилова. Термин «агрофизика» был предложен А.Г. Дояренко применительно к исследованиям почв. Эти ученые впервые обратили внимание на важность физических факторов в жизни растений и сформулировали в качестве главной задачи агрономической физики их всестороннее изучение. Агрофизические исследования того периода ограничивались полевыми наблюдениями без строгого физического эксперимента и математического анализа. Поэтому, несмотря на выдающиеся достижения исследователей того времени, им редко удавалось создавать законченные, убедительно дока-

занные теории.

В 1930-1931 годах А.Ф. Иоффе по предложению Н.И. Вавилова взялся за организацию агрофизических исследований в ФТИ АН СССР. После создания Физико-агрономического института именно сотрудники ФТИ составили ядро коллектива агрофизиков, определившее основное стратегическое научное направление своих исследований как управление продукционным процессом растений на основе измерений и расчетов.

В последующие годы выработалась специфическая для агрофизики методология научных исследований. Во-первых, она была ориентирована на управление биологическими процессами на всех стадиях онтогенеза через физические, биофизические, физико-химические воздействия непосредственно на объект управления и через окружающую этот объект среду обитания. Во-вторых, основой решений по управлению полагались измерения параметров состояния системы почва—растение—деятельный слой атмосферы и ее мониторинг. В-третьих, исследование процессов энерго- и массообмена надлежало проводить в полевых и лабораторных условиях на натуральных, лабораторных физических и математических моделях. В институте сформировался специфический подход к созданию приборов, ставший отличительной особенностью агрофизического приборостроения: от лабораторного образца, обеспечивающего максимальную полноту и точность измерений параметров физического процесса, но имеющего низкую эксплуатационную надежность, до серийного прибора с точностью, достаточной для управления этим процессом в полевых условиях, которое осуществляет технологический персонал без специальной профессиональной подготовки.

Агрофизика как естественная сельскохозяйственная наука развивалась по своим внутренним законам, однако каждый период персонального руководства научным коллективом института приносил новые направления в дополнение к основным, которые были сформулированы А.Ф. Иоффе и оказались настолько фундаментальными, что все последующие руководители неуклонно их развивали.

Руководители АФИ. Доктор физических наук академик Академии наук СССР А.Ф. Иоффе в качестве первого директора института и его научного руководителя в период с 1932 по 1960 год разработал методологию электронного агронома. Благодаря ей получило развитие специфическое агрофизическое приборостроение, использование полупроводников в сельскохозяйственном приборостроении, были созданы информационно-измерительные системы получения, сбора и хранения информации, нашли применение электронные вычислительные средства для выработки агрономических решений при управлении процессами выращивания урожая.

Доктор технических наук член-корреспондент ВАСХНИЛ С.В. Нерпин, руководивший коллективом АФИ с 1961 по 1975 год, ориентировал тематику исследований на развитие методологии математического моделирования в описании, анализе и исследованиях продукционного процесса растений и энерго- и массообмена в среде их обитания.

При докторе технических наук академике РАСХН Н.Ф. Бондаренко, занимавшем должность директора с 1975 года, получила развитие методология программированного получения урожая с использованием математических моделей продукционного процесса основных полевых культур, математической статистики и вероятностных методов. Исследования по этой тематике выполнялись комплексно многими лабораториями института с широким международным кооперативным участием (Болгария, Польша, Венгрия, Чехословакия, Германия). По инициативе Н.Ф. Бондаренко Специальным конструкторским бюро института проектировалась и создавалась

система приборного обеспечения для информационной поддержки технологий программирования урожая. Методология программирования урожая была принята отечественным и зарубежным земледелием и растениеводством.

В 1979-1996 годах институтом руководил доктор физико-математических наук член-корреспондент РАН И.Б. Усков, заложивший основы новых направлений в агрофизике: создание теории, методов и средств управления микроклиматом полей и тепличных комплексов; развитие агроклиматических исследований с использованием вероятностных подходов и методов математической статистики; разработка теоретических основ ветровой эрозии почв и методов расчета почвозащитных противоэрозионных систем и агротехнических мероприятий; создание методологии, принципов и правил применения теории подобия в агрофизике. В 1970-е годы в институте активизировались исследования по адаптации земледелия к наблюдаемой и прогнозируемой неустойчивости погоды.

С 1996 года должность директора АФИ занимал доктор сельскохозяйственных наук академик РАН В.П. Якушев. При нем интенсифицировались исследования по созданию компьютеризированных баз знаний, накопленных агрономией, растениеводством, агрохимией, агрофизикой, агробиологией, агроклиматологией, и необходимых для создания автоматизированных комплексов синтеза агротехнологий. Стали разрабатываться агрофизические адаптеры для информационной поддержки технологий выращивания культур, осуществляемой на плановом и прогнозном-оперативном временных уровнях. Развернулись исследования по научному обеспечению принципов реализации инновационных агротехнологий точного земледелия (ТЗ), ставшего следующим этапом развития метода адаптивного земледелия, работы по совершенствованию которого продолжаются в институте.

Впервые в мире идея точного земледелия была выдвинута академиком А.Ф. Иоффе в разработанной им методологии «электронного агронома». Для ее реализации Абрам Федорович предложил рассматривать сообщество растений на поле или в теплице, среду их обитания и целенаправленную деятельность человека как единую агроэкологическую систему, которую можно описать на языке математики и создать условия для выбора оптимальных агротехнических решений, анализируя количественные оценки поведения системы в различных условиях. При таком подходе появляется возможность предсказать размер урожая, который может быть получен в конкретных почвенно-климатических условиях на заданном участке земли, оценить требуемые для этого ресурсы, подобрать способы эффективного управления формированием урожая, а также определить, какие изменения будет претерпевать почва в результате применения той или иной технологии.

Так было положено начало исследованиям, обеспечившим переход от экспериментально-описательной сельскохозяйственной науки к выявлению количественных закономерностей и теоретических обобщений, а также созданы предпосылки для зарождения качественно новой методологии управления агротехнологиями. Ее основная особенность заключается в переходе от интуитивных решений, основанных только на опыте земледельца, к количественно обоснованным приемам управления технологическими процессами с использованием компьютеров. Это привело к возникновению нового научно-практического направления — программирования урожая.

Проводимые в настоящее время исследования по ТЗ в значительной

степени служат логическим продолжением работ по программированию урожаев (7, 8). Теория ТЗ может рассматриваться как закономерное продолжение развития теории программирования урожаев на новом этапе научно-технического прогресса с использованием информационных технологий, глобальных навигационных систем (ГСП) ГЛОНАСС/GPS, геоинформационных систем (ГИС) и Интернета. Принципиальное отличие ТЗ от программирования урожаев заключается в том, что рекомендуемое решение, полученное при помощи компьютерных вычислений, автоматически реализуется с учетом внутрислоевого дифференциации на заданном сельскохозяйственном поле. При программировании урожаев окончательное решение оставалось за агрономом, а дифференциация норм технологического воздействия могла проводиться лишь от поля к полю.

С 2016 года Агрофизическим институтом руководит доктор биологических наук, член-корреспондент РАН Ю.В. Чесноков. Им взята ориентация на интеграцию систем точного земледелия, почвоведения, агрометеорологии и мелиорации с адаптивным растениеводством. По сути этот интегративный процесс был обозначен в основополагающих трудах академиков А.Ф. Иоффе и Н.И. Вавилова и представляет собой установление и использование механизмов взаимодействия генотип—среда для управления продукционным процессом растений в современных условиях и на новом научно-технологическом уровне.

Исследования, которые проводятся в АФИ в настоящее время, можно условно разделить на два основных направления. Первое — это совершенствование технологий выращивания растений для оптимизации продукционного процесса (таких как технология дифференцированного внесения удобрений, мелиорантов и других агрохимикатов), включая оценку состояния растений и посевов дистанционными методами. Второе направление — улучшение растений с помощью инновационных селекционно-генетических и агрофизических технологий, а также получение сортов основных сельскохозяйственных культур, превосходящих существующие по урожайности и качеству, устойчивых к почвенно-климатическим условиям регионов возделывания, эффективно использующих природные ресурсы (свет, вода, элементы минерального питания и др.), отзывчивых на внесение удобрений, мелиорантов и других агрохимикатов. В рамках этих направлений также осуществляется разработка методов, основанных на цифровых неинвазивных оптических, рентгенографических и иных агрофизических способах мониторинга физиологического состояния растений и посевов, а также их ускоренного фенотипирования по хозяйственно ценным признакам, продуктивности и стрессоустойчивости к абиотическим факторам среды. Кроме того, получили развитие мелиоративная и почвенно-земледельческая теории (особенно в области физики, физико-химии и биофизики почв, включая их водный, газовый режим и физико-механические свойства), теория и практика химической мелиорации кислых почв; ведутся исследования по агроэкологическому мониторингу и поиску способов снижения накопления токсичных веществ и элементов в сельскохозяйственной продукции; разрабатываются научные основы систем воспроизводства почвенного плодородия, применения удобрений, севооборотов, обработки почвы; ведутся исследования по созданию рабочих органов дренапромывочных машин закрытого трубчатого дренажа и подготовке нормативных документов по мелиорации полей и другим направлениям научно-исследовательских работ.

Развитие научных направлений. Исследования профессора Ф.Е. Колясева (1898-1958) во многом способствовали началу развития зем-

ледельческой теории в агрофизике. В его трудах (9, 10) рассмотрены приемы и методы управления водным балансом почв в различных почвенно-климатических зонах страны, разработана теория дифференциальной влажности почв.

Работы профессора П.В. Вершинина (1909-1978) (11, 12), в которых освещены теоретические и практические вопросы структурирования почв, применения химических структурообразователей, в том числе для защиты от эрозии, имели значение при создании теории и методов управления почвенной структурой. Заметный вклад в развитие теоретических основ почвообразовательного процесса в системе растительно-почвенного комплекса внес академик Е.И. Ермаков (1929-2006). Благодаря научной школе профессора И.Б. Ревута (1909-1978) были заложены агроэкологические основы обработки почв для почвенно-климатических зон страны, а физика почв введена в земледелие (13-15).

Член-корреспондент ВАСХНИЛ С.В. Нерпин (1915-1993) создал два направления в агрофизическом почвоведении: почвенную гидромеханику и теоретическую физико-химическую механику почв. Его монографии (16, 17), в которых разработаны теория и методы управления водным режимом полей, не имеют аналогов в мировой научной литературе. Основополагающие работы профессора А.М. Глобуса (1930-2008) (18, 19) фактически положили начало исследованиям по гидрофизике почв.

Профессор М.К. Мельникова (1901-1986) — руководитель первой в России радиохимической лаборатории была инициатором развернутых исследований по физической химии почв и родоначальником изучения поведения продуктов деления урана и плутония в почве. В ее исследованиях (20, 21) впервые разработан метод изотопных индикаторов в почвоведении. Заметным вкладом в теорию ионного обмена в почвах, включая почвенную кислотность, стали труды профессора Ю.А. Кокотова (22-24). Профессор Н.Ф. Батыгин (1928-2000) создал теоретическую базу для агрофизического направления в отечественной радиобиологии (25).

В 1928 году при Государственном институте опытной агрономии был организован сектор агроклиматологии. В 1932 году в Главной геофизической обсерватории (ГГО им. А.И. Воейкова) были развернуты исследования по агро- и микроклиматологии для агроклиматического районирования и оценки климатических ресурсов в сельскохозяйственном производстве, но в августе 1935 года эти работы прекратили. В тот период они стали развиваться в АФИ, где исследования были ориентированы на анализ физических процессов, формирующих микроклимат полей и посевов, в отличие от географического климатического подхода, принятого в ГГО.

В монографиях (26-28) профессора А.Ф. Чудновского (1910-1985) — сподвижника и последователя А.Ф. Иоффе были разработаны теория и методы управления тепловым режимом почв. Уже в первый выпуск научных трудов Агрофизического института в 1935 году вошли статьи по тепловому и водному режимам почв (авторы Б.П. Александров, А.В. Куртнер, Н.Н. Банасевич). Третий сборник, вышедший в 1941 году, содержал раздел «Вопросы микроклимата». Развитию теории агроклиматологии и ее практическим аспектам посвящены монографии профессоров Д.А. Куртнера и И.Б. Ускова (29, 30).

Началом исследований в области экологической физиологии растений послужила всемирно известная монография одного из первых физиологов растений АФИ академика Н.А. Максимова (1880-1952) «Физиологические основы засухоустойчивости растений» (31). Профессор В.П. Мальчевский (1906-1942) разработал приемы светокультуры и светостимуляции в

теплицах и закрытых помещениях с искусственными источниками света, им предложена световая стимуляция семян проростков и рассады с целью увеличения интенсивности фотосинтеза и сокращения сроков вегетации; работы В.П. Мальчевского — весомый вклад в создание основ теории светофизиологии и светокультуры растений.

Термин «биокибернетика растений» и идеология такого подхода были предложены В.Г. Кармановым (1913-1997) и развиты как наука о кибернетическом управлении физиологическими процессами в растениях. Ключевым элементом биокибернетики стали фитомониторинг (С.С. Радченко) и биофизические представления о процессах транспорта и энергообмена в растениях, включая клеточные мембраны (профессор О.О. Лялин, 1932-1994). На основе разработок В.Г. Карманова была создана первая вегетационная светостановка, после чего в институте стали развиваться новые направления исследований по светофизиологии и была создана серия отечественных вегетационных установок искусственного климата. Труды (32-34) члена-корреспондента ВАСХНИЛ Б.С. Мошкова (1904-1997) получили мировую известность и внесли основополагающий вклад в теорию светофизиологии. Им открыта физиологическая роль листа как органа, воспринимающего фотопериодическое воздействие. Явление фотопериодизма позволило объяснить некоторые закономерности распространения культурных растений, открытые Н.И. Вавиловым. На основе фотопериодизма были разработаны приемы управления ростом и развитием растений. Б.С. Мошков в светостановках показал возможность использования светопериодизма для псевдоуправления мутагенезом и селекционным процессом в регулируемых условиях. На углубленной генетической основе расширены исследования по повышению эффективности селекции с использованием преимуществ, которые дает такой подход. Получили развитие технологии выращивания растений в защищенном грунте при электрическом освещении.

Методология создания совершенных регулируемых крупноразмерных агроэкосистем, предложенная академиком РАСХН Е.И. Ермаковым (1929-2006), опиралась на предложенные им принципы физического моделирования. Такие агроэкосистемы обеспечивали круглогодичное получение высококачественной растительной продукции с заданным биохимическим составом (35). Под руководством Е.И. Ермакова сконструировано оригинальное вегетационно-облучательное оборудование, в том числе уникальная ризотронная техника с двумерной корнеобитаемой средой. На базе регулируемых агроэкосистем проводились комплексные исследования эволюционной трансформации исходно абиогенных субстратов в почвоподобные биокосные образования. Разработаны основы и приемы биоремедиации почв, загрязненных компонентами жидкого ракетного топлива, нефтью и нефтепродуктами. Получило дальнейшее развитие генетическое направление исследований по программированию трансгрессий для целей селекции и интродукции растений. Начали проводиться работы, посвященные, в том числе, изучению водного статуса растений, их реакции на действие повышенных доз ультрафиолетовой радиации и других абиотических стрессовых факторов физического и физико-химического характера.

Специальное конструкторское бюро Агрофизического института (Ю.П. Барышнев) разработало и запустило в производство тематический ряд оригинальных вегетационно-климатических установок с управляемыми температурным, световым и влажностным режимами в широком диапазоне параметров. В 1982 году эти разработки были отмечены Государственной премией СССР. Долгое время такими установками оснащали отечественные фитотроны, физиологические и селекционно-генетические лаборатории.

Международное экспертное сообщество признало АФИ ведущей научной школой, определяющей формирование агрофизики как самостоятельной отрасли естественных наук. Научные организации подобной направленности создавались в Болгарии, Австралии, Венгрии, Швейцарии и Германии. Известный польский физик профессор Б. Добжанский (Bohdan Dobrzański, 1909–1987) после посещения ленинградского института добился создания в г. Люблине всемирно известного Института агрофизики в составе Польской академии наук.

Важным стимулом творческого сотрудничества ученых стал выпуск научных трудов института. Первый сборник вышел в свет в 1935 году и посвящался вопросам почвенной структуры и тепловому режиму почв. Последующие тематические сборники издавались ежегодно (от одного до пяти выпусков) вплоть до 1998 года.

Выпуск международного научного журнала по агрономической физике «International Agrophysics» был организован благодаря содружеству ученых из Европы, Азии и Америки. Журнал издавался при кафедре физики Университета сельскохозяйственных наук (г. Будапешт) и сначала был посвящен изучению физических свойств почв и вопросам качества сельскохозяйственной продукции. С 1985 года издание журнала принял на себя Институт агрофизики Польской академии наук с расширением представляемых научных направлений (физические аспекты изучения окружающей среды и сельскохозяйственных наук).

Современные направления научных исследований в АФИ. Труды академика Н.Ф. Бондаренко (1928–2003) обеспечили развитие агрофизического научного обеспечения и расширенное практическое применение метода программирования урожаев. На их основе были разработаны информационные технологии точного земледелия (8).

По мере развития смежных с агрофизикой отраслей физики, геофизики, биофизики и физиологии растений, математической физики и вычислительной математики возникли новые направления агрофизических исследований, ориентированные на разработку приемов активного вмешательства в процессы роста и развития посевов и управления этими процессами. К таким направлениям (36–40) можно отнести математическое имитационное моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных растений (Р.А. Полуэктов); разработку теории подобия агрофизических систем и процессов (Б.Н. Мичурин, А.М. Глобус, И.Б. Усков, В.Г. Онищенко); анализ взаимодействия биологических объектов с физическими полями различной природы — световыми, гравитационными, магнитными, электромагнитными, акустическими, электростатическими (Б.С. Мошков, Н.Ф. Батыгин, Н.Ф. Бондаренко, И.С. Лискер, В.Н. Лазутин); создание и оптимизацию информационных технологий управления продукционным процессом в земледелии и растениеводстве (В.П. Якушев, И.М. Михайленко); конструирование и приборное оснащение вегетационных установок с регулируемым климатом (В.Г. Карманов, А.Ф. Чудновский, Ю.П. Барышнев); агрофизическое приборостроение (И.П. Ананьев, Ю.И. Блохин); разработку координатного прецизионного земледелия как современного продолжения методологии «электронного агронома» (В.П. Якушев).

Изменения климата с каждым годом становятся все более важной темой в мировой повестке. В 2021 году управление выбросами углекислого газа было одним из самых обсуждаемых вопросов на мировых форумах высочайшего ранга. Прогнозы изменений климата от ведущих мировых институтов, получаемые с применением множества различных моделей, основаны на разных вариантах ожидаемого количества выбросов CO₂. Такие

прогнозы систематизирует и оценивает Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК; Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Швейцария). В Лаборатории агроклимата АФИ предложены оригинальные методы сбора и анализа таких прогнозов, что в сочетании с уже имеющимися агрометеорологическими данными позволяет получать беспристрастные оценки вероятных изменений климата, основанные на математике нечеткой логики, легко адаптируемые для машинного обучения и анализа с использованием искусственного интеллекта.

Наблюдаемые климатические изменения сопровождаются повышением частоты возникновения опасных для растениеводства явлений, что требует решения проблемы управления агроклиматическими рисками. В АФИ разработано программное обеспечение, позволяющие обрабатывать большие массивы данных о существующем и прогнозируемом агроклимате в сочетании с измеренными агрохимическими параметрами почвы и на этой основе делать вероятностные прогнозы урожаев основных культур, которые могут быть картированы для конкретного пользователя с учетом особенность микроклимата полей (41-45).

Точное земледелие (ТЗ) — одно из направлений современных научно-исследовательских работ в АФИ, разрабатываемое с 2002 года под руководством академика В.П. Якушева (8), — без преувеличения можно назвать мировым трендом адаптации производства растениеводческой продукции к внутрислоевой изменчивости условий формирования урожая. Обоснованное планирование и последующая дифференциация технологических воздействий в современных системах земледелия находятся в непосредственной зависимости от степени внутрислоевой неоднородности (7). Создание надежных и доступных методов обнаружения такой неоднородности, определения степени ее интенсивности и пространственного распределения на сельскохозяйственных полях — ключевая задача при управлении производством растениеводческой продукции в системе ТЗ.

Перспективный масштабируемый ресурс для решения указанной задачи — данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (8), интерпретация которых позволяет проводить сплошную непрерывную оценку состояния посевов и среды их обитания с одновременным охватом значительных площадей. В России с ее значительной территорией (и при возрастающей доступности аэрокосмических данных) такому подходу в информационном обеспечении современного земледелия нет альтернативы. Аэрокосмические данные ДЗЗ, наземные измерительные системы и математические модели дают возможность существенно повысить качество и масштабы информационного обеспечения сельского хозяйства, мониторинга крупных природных объектов и явлений (земельные кадастры, леса, водоемы, пожары, наводнения) (46).

Учеными АФИ под руководством В.П. Якушева предложены два новых метода использования ДЗЗ. Первый предполагает применение вариограммного анализа спутниковых снимков, второй основан на комплексной оценке динамики изменения оптических показателей индексов отражения, вычисленных по гиперспектральным снимкам. Разработан базовый алгоритм обнаружения и выделения границ внутрислоевой неоднородности по гиперспектральным снимкам сельскохозяйственных полей и применении оптических критериев (индексы отражения), характеризующих специфические и неспецифические особенности спектральных показателей посева при воздействии стрессоров. Для реализации геостатистического подхода создан и апробирован инструментальный построения по данным ДЗЗ эмпирических

вариограмм и их аппроксимаций, функционально описывающих статистическую структуру пространственно варьирующих показателей состояния почвы или посева на сельскохозяйственном поле. Изучена перспектива автоматизации этого процесса. Вариограммный анализ — эффективный метод, позволяющий охарактеризовать структуру пространственной изменчивости данных. Он широко применяется для оценки пространственной неоднородности значений поверхностного отражения и улучшения классификации изображений. Необходимо отметить, что использование новых методов анализа и интерпретации спутниковых данных позволит существенно увеличить масштабы информационного обеспечения технологий ТЗ.

В 2009–2017 годах была разработана концепция и теоретическая база управления агротехнологиями в точном земледелии, которая продолжает совершенствоваться (47). Согласно предложенной концепции, общая задача управления агротехнологией включает четыре уровня задач, решаемых в разных временных масштабах. На верхнем, 1-м уровне решается задача управления севооборотами в годовом масштабе; на 2-м, реализуемом в суточном масштабе на одном интервале вегетации, — задача программного управления; задачи 3-го и 4-го уровней реализуются в реальном времени. На всех уровнях объектом управления служит поле с посевом сельскохозяйственной культуры. Однако в концепции не учитывается тот факт, что в состав агроценоза, кроме основной культуры, входят однолетние и многолетние сорные растения. Они конкурируют с культурой за влагу и элементы питания, а потери урожая от засоренности посевов могут превышать 50 %. Поэтому оптимальные технологические программы на всем интервале вегетации должны включать не только операции по внесению удобрений и поливы, но и обработки гербицидами. Такие программы должны формироваться с учетом того, что минеральное питание стимулирует рост как культурных растений, так и сорняков, а гербициды не только подавляют рост и развитие сорняков, но действуют угнетающе и на культурные растения.

Формирование единой программы управления, учитывающей состояние основной культуры и сорных растений и включающей одновременное внесение минеральных удобрений и обработки гербицидами, позволяет избежать потерь урожая и перерасхода удобрений. Кроме того, оптимизация доз удобрений, отвечающих биологическим потребностям культуры в питательных элементах, активизирует процессы обмена веществ, обеспечивает ускорение инактивации гербицида и повышает устойчивость к нему. То есть вследствие более интенсивного накопления органической массы происходит ростовое уменьшение концентрации гербицида в тканях растений, а меньшие количества препарата при оптимальном обмене веществ быстрее инактивируются. Оптимальные условия питания повышают и общую биологическую конкурентоспособность культуры по отношению к сорнякам. Следовательно, совместное использование гербицидов с минеральными удобрениями — один из эффективных приемов борьбы с сорняками в посевах и существенного повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Для осуществления такой идеи потребовалась существенная доработка концепции и теории управления агротехнологиями: были предложены новые математические модели агроценоза, критерии оптимальности и алгоритмы формирования программ управления. Также понадобятся принципиально иные роботизированные технологические машины, которые значительно ускорят процесс управления посевами.

Наблюдаемые в настоящее время экстремальные проявления погодных условий могут привести к дисбалансу таких экологических функций

системы почва—растение—деятельный слой атмосферы, как биогеохимический круговорот, энерго- и влагообмен, накопление, транспорт и вынос питательных элементов, буферная способность. Существуют неопределенности в точной оценке условий устойчивости (способность к сопротивлению воздействиям) и восстановления (скорость и степень возвращения к первоначальному динамическому равновесию) баланса этих экологических функций указанной системы. Поэтому целостный анализ состояния системы до и после воздействий должен основываться на результатах междисциплинарных сопряженных исследований (48).

Совершенствование методологии исследований устойчивости и восстановления системы почва—растение—деятельный слой атмосферы после естественных и антропогенных воздействий в АФИ проводится по трем сопряженным междисциплинарным направлениям.

В рамках первого направления выполняют инструментальные исследования физических (плотность сложения, агрегатный состав), физико-химических (рН), гидрофизических (содержание влаги, основная гидрофизическая характеристика, влагопроводность) и в будущем — теплофизических (температура, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность) свойств почв (49-51). Полученные результаты необходимы для анализа тесноты взаимосвязей между свойствами почв при оценке их устойчивости и восстановления после природных и антропогенных воздействий.

Второе направление включает инструментальный анализ циклов углерода и азота, которые представляют собой фундаментальные взаимозависимые процессы в глобальном биогеохимическом круговороте веществ в экосистемах. Современные исследования направлены на сопряженную оценку степени взаимосвязей циклов углерода и азота в различных климатических условиях с динамикой температуры, содержания влаги и кислорода, доступных соединений азота и углерода, микробиологической и ферментативной активности, главным образом в самой верхней части генетического профиля почв. Во-первых, инструментальные исследования в целом предусматривают анализ влияния природных и антропогенных воздействий на секвестрацию органического вещества в почвах и их илистых фракциях (52, 53). Интенсивность секвестрации и степень закрепления углерода в генетических профилях почв в наибольшей степени обусловлены количеством и минералогическим составом их илистой фракции, содержанием гидроокиси железа при различных окислительно-восстановительных, гидрофизических, теплофизических, биохимических и микробиологических условиях. Именно поэтому для совершенствования методологии необходимо углубление знаний о фундаментальных механизмах секвестрации углерода в почвах в результате взаимодействий неспецифических (углеводы, лигнин, липиды, фенолы, аминокислоты) и специфических (гумусовые кислоты) органических соединений с первичными и вторичными глинистыми минералами в генетических профилях почв с целью оценки значимости этих механизмов в сохранении устойчивости и восстановлении баланса цикла углерода. Во-вторых, современное изучение циклов углерода и азота в различных системах землепользования преимущественно посвящено анализу влияния свойств почв на микробиологические процессы формирования в них двуокси углерода (CO_2) и закиси азота (N_2O), а также на внутрипочвенные и прямые потоки этих веществ из почв (54-56). Требуется количественная оценка условий формирования доминантных процессов минерализации органического вещества, автотрофного и гетеротрофного дыхания, нитрификации и денитрификации в профилях различных

почв, преимущественных путей транспорта CO_2 и N_2O в профилях почв, вклада внутривертикального транспорта CO_2 и N_2O в их прямые эмиссии из почв, а также роли вышеупомянутых управляемых процессов в сохранении устойчивости и восстановлении баланса циклов углерода и азота.

В рамках третьего направления исследований проводится анализ тесноты связей метеорологических параметров приземного слоя атмосферы, а также составляющих теплового и водного баланса подстилающей поверхности с гидрофизическими и теплофизическими свойствами почв (57-59). Совершенствование методологии предполагает более корректное описание скрытых и явных потоков тепла и влаги между стратифицированным приземным слоем воздуха и шероховатой подстилающей поверхностью, более глубокий анализ механизмов транспорта потоков тепла, капиллярной и пленочной влаги в генетических горизонтах почв, обоснованный анализ степени взаимосвязей между потоками тепла и влаги в почве и из подстилающей поверхности с целью точной оценки их сопряженного вклада в достижение требуемых условий устойчивости и восстановление взаимодействия почва—растение—деятельный слой атмосферы.

В Агрофизическом институте продолжают исследования по актуальным проблемам методологии полевого эксперимента, агроэкологического мониторинга, управления эффективным плодородием почв, фитосанитарным состоянием и продуктивностью агроценозов. Так, в Меньковском филиале АФИ создана многоуровневая система полевых экспериментов, которая служит методической базой для масштабных фундаментальных и прикладных исследований (60). Благодаря ей с использованием новых методических подходов были существенно развиты фундаментальные и прикладные основы точных систем удобрения посевов (61, 62), методология фитосанитарного мониторинга и прикладные аспекты прецизионной интегрированной защиты растений (63, 64), разработаны теоретические вопросы взаимодействия мелиорантов с почвой, исследованы адаптационные, агроэкологические и агроэкономические аспекты мелиорации и окультуривания дерново-подзолистых почв, в том числе на вторично осваиваемых сельскохозяйственных угодьях (60, 62, 65).

Особое внимание в АФИ уделяется мелиорации земель как одному из способов адаптации российского сельскохозяйственного производства к изменению климата, которое может существенно повлиять на агрофизику и физико-химию почв, в частности на их водопроницаемость. Так, повышение температуры в зимний период заметно уменьшило глубину промерзания почвы в Нечерноземной зоне России (в среднем со 100-120 до 45-70 см) и, как следствие, ограничило криогенное восстановление вертикального порового пространства, играющего важную роль в формировании общей водопроницаемости почвенной толщи (66). Этот факт оказал существенное влияние на эффективность работы закрытых осушительных систем. Его негативные последствия наблюдаются при отводе стоков с осушенных закрытым трубчатым дренажом полей во время выпадения ливневых осадков. В этой связи в Агрофизическом институте в последние годы начато изучение возможностей восстановления закрытого трубчатого дренажа с истекшим сроком эксплуатации и заилением более 80 % сечения трубчатых дрен. Теоретические исследования процессов разрушения и транспортировки иловых отложений в трубчатой полости дрены к ее устью, проверенные на моделях и на специально разработанном исследовательском стенде, позволили наладить изготовление фрезерных рабочих органов дренапромывочных машин, предназначенных для эксплуатации при вос-

становлении неисправного осушительного трубчатого дренажа (67). Кроме того, выпущено научно-практическое руководство по уменьшению рисков выращивания сельскохозяйственных культур на осушенных мелиорированных землях при изменяющемся климате (68). Проведены комплексные испытания и разработаны регламенты производства, применения и технические условия для более чем двух десятков мелиорантов и удобрительных материалов. В России известкование более 70 % кислых почв выполняется с использованием нормативно-технической документации, разработанной в Агрофизическом институте.

С использованием методик ДЗЗ обследованы мелиорированные земли и определено техническое состояние дренажных систем. Разработки Агрофизического института по оценке объектов сельскохозяйственной мелиорации с помощью беспилотных воздушных судов нашли применение при проектировании, ремонте и строительстве таких объектов (69).

Современные исследования по светофизиологии растений и биопродуктивности агроэкосистем ориентированы на познание закономерностей взаимодействия растений и сопутствующей биоты со средой обитания в регулируемой агроэкосистеме при моделировании оптимальных и стрессовых условий, а также на разработку приемов и средств повышения устойчивости растений к стрессовым факторам и получения стабильных высоких урожаев требуемого качества в условиях защищенного и открытого грунта (70, 71).

Особое внимание уделяется генетико-селекционной методологии повышения продуктивности и устойчивости сельскохозяйственных культур к эколого-географическим и ландшафтно-климатическим условиям регионов возделывания, получению новых форм с прогнозируемым комплексом хозяйственно ценных свойств с учетом особенностей взаимодействия генотип—среда (72, 73).

На протяжении десятков лет в АФИ разрабатываются высокоэффективные ресурсосберегающие фитобиотехнологии и оригинальное светооблучательное оборудование для круглогодичного интенсивного производства растительной продукции с заданными качественными и функциональными характеристиками (71, 74). Апробированы системы экспресс-оценки физиологического состояния вегетирующих растений и качества семенного материала с помощью информационно-измерительных средств фитомониторинга, оптических и рентгенографического методов (75-77).

Продолжение изучения механизмов взаимодействия генотип—среда в контролируемых условиях позволит углубить представления о фундаментальных основах управления продукционным процессом растений и регулирования потоков биогенных элементов в агроэкосистемах. Эти данные будут также использованы для создания высокоценных по признакам продуктивности и качества форм растений, полученных с применением оригинальной генетико-селекционной методологии, био-, нано-, агротехнологий следующего поколения и прикладной цифровизации (71, 78-80). Среди ближайших научных и практических задач института — работы по оптимизации продукционного процесса в условиях интенсивной светокультуры и создание наукоемких автоматизированных автономных стационарных и мобильных фитотехнологических комплексов с оригинальным вегетационно-облучательным оборудованием и ресурсосберегающими агротехнологиями для непрерывного круглогодичного получения растительной продукции с заданными функциональными и качественными характеристиками в непосредственной близости от потребителя вне зависимости от природно-кли-

матических условий (71, 81, 82). Получение высокопродуктивных форм растений (в том числе с помощью маркер-вспомогательной селекции, marker-assisted selection, MAS) (83-85), предназначенных для интенсивной светокультуры, — существенный элемент предлагаемых оригинальной эффективной междисциплинарной методологии и технологий формирования растительной продукции и сырья с заданными качественными и количественными характеристиками (71, 86).

Еще одно перспективное научное направление связано с практическим использованием микроорганизмов. В частности, для конверсии растительных остатков и регенерации отработанных органоминеральных субстратов представляют интерес микроорганизмы, продуцирующие одновременно монооксигеназные и гидролитические целлюлазы (79, 87). В институте разрабатываются фундаментальные основы участия микроорганизмов в генерации электроэнергии в системе растение—микроорганизмы—корнеобитаемая среда (80, 88). При создании биопрепаратов комплексного действия учитываются особенности секреции микробных экзометаболитов и их влияния на продукционный процесс сельскохозяйственных культур в благоприятных и стрессовых условиях (71).

Основу интегративных междисциплинарных исследований взаимодействия генотип—среда составит цифровая методология контроля продукционного процесса (в том числе в системе точного земледелия) (8, 89-91) и качества семенного материала, диагностики и оценки состояния полей с помощью методов дистанционного зондирования и прогнозирования продуктивности посевов (46, 92, 93), определения толерантности и адаптивности возделываемых растений к действию абиотических стрессоров (с применением неинвазивных оптических, рентгеноскопических и других физических методов анализа и цифровизации) (75-77).

Международное научное сотрудничество. Многие ученые-агрофизики и организаторы науки из стран Прибалтики, Закавказья, Средней Азии, Китая, Вьетнама, Восточной и Западной Европы начинали свой научный путь в АФИ. Агрофизический институт имеет устойчивые связи с ведущими научными центрами и университетами Польши, Германии, Венгрии, Молдовы, Беларуси, Словакии, Чехии, других стран.

Так, в рамках научного сотрудничества со Словацким сельскохозяйственным университетом (*Slovenská poľnohospodárska univerzita — Slovak University of Agriculture, SUA*, г. Нитра, Словакия) российскими и словацкими учеными выполнены совместные исследования процессов энерго- и массообмена в системе почва—растение—атмосфера. Показано, что использование биоугля дает много преимуществ сельскому хозяйству за счет улучшения всего комплекса свойств почвы, в том числе ее структуры. Однако разнообразные эффекты воздействия биоугля зависят от его физико-химических свойств, норм внесения, исходных свойств почвы и т.д. Исследование проводилось в 2017-2019 годах в полевом опыте с биоуглем *Naplic Luvisol* на экспериментальной станции *SUA*. Первоначальное, а также повторное применение биоугля приводило к улучшению структуры почвы. Увеличение содержания почвенного органического вещества за счет первоначального и повторного внесения биоугля значительно поддерживало стабильность почвенных агрегатов, в то время как органическое вещество на основе гуминовых веществ не обеспечивало такой стабильности (52, 57).

Развивается научно-техническое сотрудничество с ТОО «Научно-производственный центр зернового хозяйства им. А.И. Бараева» (Акмолинская обл., Республика Казахстан) по эффективному применению програм-

мно-аппаратных и технических комплексов в агропроизводстве. На специализированном опытном полигоне в Республике Казахстан были оценены перспективы использования разработанной в АФИ системы точного земледелия. На ее основе предложен новый алгоритм, использующий данные дистанционного зондирования и наземных измерений, который позволяет перейти от неэффективных мониторинговых мероприятий и статической оценки наблюдаемых явлений к прецизионным управляющим приемам и оперативному применению средств коррекции урожая, обеспечивающим повышение продуктивности яровой мягкой пшеницы. Кроме того, по динамике изменения агроландшафтных полевых условий, определяемых рельефом местности, удалось описать распределение водотоков, которые характеризовали запас продуктивной влаги в той или иной части поля (94, 95).

Агрофизическим институтом и Центром изучения аграрных ландшафтов (The Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research — ZALF, г. Мюнхеберг, Германия) проводятся совместные исследования по созданию и использованию динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений в прикладных и теоретических задачах агроэкологии. Так, в АФИ предложена интегрированная система моделирования продукционного процесса сельскохозяйственных культур, которая применима для анализа агротехнологий, в частности альтернативных стратегий планирования севооборотов в различных системах земледелия. Показано, что у растений процессы цветения и вызревания семян, как правило, лучше моделируются медианой ансамбля моделей, чем средним значением ансамбля и отдельными моделями. Урожайность точнее оценивается не ансамблем моделей, а лучшими моделями. Более высокая точность обычно достигается для яровых посевов, лучшие результаты получены для кукурузы на силос, а самую низкую результативность (по индексу согласия) отмечали для озимого рапса. Установлено, что для севооборота следует выбирать только модели с разумной точностью (то есть без сбоев) для всех включенных культур в целевой среде. В целом, применение разработанного ансамбля моделей сельскохозяйственных культур служит одним из способов повышения точности прогнозов, но при этом возможна относительно низкая изменчивость выходных данных ансамбля, что указывает на вариограмность исследуемых полей для различных видов возделываемых культур (96).

С 2016 года Агрофизический институт участвует в работе технического комитета ISTA (Advanced Technologies Committee, International Seed Testing Association, г. Валлиселлен, Швейцария) по новым технологиям оценки качества семенного материала. В 2022 году на 33-м Международном конгрессе ISTA (г. Каир, Египет) ученые АФИ представили доклад «Software for processing and analysis of digital X-ray images of seeds» (<https://www.seed-test.org/api/rm/R4G8AC7KS6QARNA/4-software-for-processing-and-analysis-of-digital.pdf>), охватывающий ряд разработок АФИ (программное обеспечение для улучшения качества исходных цифровых рентгеновских изображений семян, программное обеспечение «ВидеоТест-Морфология» для автоматического анализа цифровых рентгеновских изображений семян, программное обеспечение «Паспорт-Зерно» для автоматического распознавания основных типов скрытых дефектов семян зерновых культур — пшеницы, ячменя, риса, ржи). Также был анонсирован вступивший в силу с 1 января 2022 года российский ГОСТ Р 59603-2021 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии». Представленные разработки в дальнейшем позволят гармонизировать указанный национальный стандарт с действующими ISTA Rules в части рентгенографиче-

ского анализа семян. Ранее подходы по рентгенографии семян, предложенные в АФИ, были отражены в публикациях в российских и зарубежных научных журналах (97, 98).

Сотрудничество ученых Агрофизического института с коллегами из Лейбниц-Института генетики растений и исследования возделываемых культур (Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung, г. Гатерслебен, Германия) — одно из наиболее длительных и масштабных. Проведен ряд исследований по установлению эколого-генетических механизмов взаимодействия генотип—среда, в частности по выявлению и идентификации генов и локусов хромосом, определяющих хозяйственно ценные признаков у яровой мягкой пшеницы. В результате многолетнего и плодотворного сотрудничества российским и немецким партнерам удалось не только установить и идентифицировать QTL (quantitative trait loci), обуславливающие проявление более чем 40 хозяйственно ценных признаков в контролируемых условиях агроэкобиополигона (99), картировать QTL индексов диффузного отражения листьев (75), но и провести ассоциативное картирование и полногеномное изучение локусов хромосом и генов, детерминирующих признак морозоустойчивости у яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) (100-102). Кроме того, в сотрудничестве с коллегами из Института сельскохозяйственной микробиологии (г. Санкт-Петербург—Пушкин, Россия) и Национального института ботанических исследований (CSIR-National Botanical Research Institute, г. Лукноу, Индия) изучена устойчивость к высокотоксичному металлу никелю у *T. aestivum* во взаимодействии растений с ризобактериями и определены этапы ризобияльных защитных механизмов в растительно-бактериальных ассоциациях при никелевом стрессе (103). Показано, что оба партнера (растение и бактерии) способны снижать токсичность никеля и выработали разные механизмы и стратегии, которые проявляются в растительно-бактериальных ассоциациях. В дополнение к физическим барьерам, таким как клеточные стенки растений, толстые кутикулы и трихомы, которые снижают аномальный уровень поступления никеля, растения уменьшают токсичность никеля, используя свои собственные механизмы антиоксидантной защиты, включая ферменты и другие антиоксиданты. Бактерии, в свою очередь, эффективно защищают растения от никелевого стресса и могут быть использованы в фиторемедиации (104, 105).

Таким образом, за 90-летнюю историю Агрофизический институт, основанный по инициативе академиков А.Ф. Иоффе и Н.И. Вавилова, приобрел широкое международное признание. Основные направления выполняемых здесь исследований — познание фундаментальных закономерностей функционирования агроэкологических систем; разработка научных основ, методов и средств изучения физических, физико-химических, биологических и биофизических процессов в системе почва—растение—деятельный слой атмосферы и создание имитационных математических моделей этих процессов; разработка теоретических основ, методов и средств управления продуктивностью агроэкологических систем с целью повышения эффективности и устойчивости земледелия и растениеводства в природных и регулируемых условиях; разработка и создание технических средств получения информации о состоянии растений и сред их обитания. В исследованиях применяются методические подходы агрономической физики и смежных с ней наук — агроэкологии, почвоведения, генетики, биофизики и физиологии растений, агроклиматологии, информатики, вычислительной математики, кибернетики и приборостроения. Успешно развиваются инновационные научные направления — создание приемов эффективного управ-

ления процессами роста и развития, а также продуктивностью посевов посредством воздействия физических, физико-химических и других абиотических факторов на среду обитания растений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов Н.И. *Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости*. М.-Л., 1935.
2. Вавилов Н.И. *Научные основы селекции пшеницы*. М.-Л., 1935.
3. Вавилов Н.И. *Опыт агроэкологического обозрения важнейших полевых культур*. М.-Л., 1957.
4. Иоффе А.Ф. *Физика и сельское хозяйство*. М.-Л., 1955.
5. Иоффе А.Ф. *Советская агрофизика*. М., 1957.
6. Иоффе А.Ф., Ревут И.Б. *Физика на службе сельского хозяйства*. М., 1959.
7. Батыгин Н.Ф. *Онтогенез высших растений*. М., 1986.
8. Якушев В.П. *На пути к точному земледелию*. СПб, 2002.
9. Колясев Ф.Е., Вершинин П.В. *Метод искусственного образования структуры почвы*. М.-Л., 1935.
10. Колясев Ф.Е., Мельникова М.К. К теории дифференциальной влажности почвы. *Почвоведение*, 1949, 3: 177-193.
11. Вершинин П.В., Константинова В.П. *Физико-химические основы искусственной структуры почв*. М., 1935.
12. Вершинин П.В. *Почвенная структура и условия ее формирования*. М.-Л., 1958.
13. Ревут И.Б. *Физика в земледелии*. М.-Л., 1960.
14. Ревут И.Б. *Как правильно обрабатывать почву*. М., 1966.
15. Ревут И.Б. *Физика почв*. Л., 1964.
16. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. *Физика почв*. М., 1967.
17. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. *Энерго- и массообмен в системе растение-почва-воздух*. Л., 1975.
18. Глобус А.М. *Экспериментальная гидрофизика почв*. Л., 1969.
19. Глобус А.М. *Физика неизотермического внутрпочвенного влагообмена*. Л., 1983.
20. Вершинин П.В., Мельникова М.К., Мичурин Б.Н., Мошков Б.С., Поясов Н.П., Чудновский А.Ф. *Основы агрофизики*. М., 1959.
21. Мельникова М.К., Ковеня С.В. Применение радиоактивных индикаторов для моделирования процесса лессиважа. *Почвоведение*, 1971, 10: 42-49.
22. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. *Равновесие и кинетика ионного обмена*. Л., 1970.
23. Кокотов Ю.А. *Иониты и ионный обмен*. Л., 1980.
24. Кокотов Ю.А., Золотарев П.П., Елькин Г.Э. *Теоретические основы ионного обмена: сложные ионообменные системы*. Л., 1986.
25. Батыгин Н.Ф. *Использование ионизирующей радиации при управлении жизнедеятельностью растений*. Автореф. докт. дис. Л., 1968.
26. Чудновский А.Ф. *Теплообмен в дисперсных средах*. М., 1954.
27. Чудновский А.Ф., Шлимович Б.М. *Полупроводниковые приборы в сельском хозяйстве*. Л., 1970.
28. Чудновский А.Ф. *Теплофизика почв*. М., 1976.
29. Куртнер Д.А., Усков И.Б. *Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте*. Л., 1982.
30. Куртнер Д.А., Усков И.Б. *Управление микроклиматом сельскохозяйственных полей*. Л., 1988.
31. Максимов Н.А. *Физиологические основы засухоустойчивости растений*. Л., 1926.
32. Мошков Б.С. *Выращивание растений на искусственном освещении*. М.-Л., 1966.
33. Мошков Б.С. *Фотопериодизм растений*. М., 1961.
34. Мошков Б.С. *Актиноритмизм растений*. М., 1987.
35. *Избранные труды Евгения Ивановича Ермакова* /Г.Г. Панова (сост.). СПб, 2009.
36. Чудновский А.Ф., Карманов В.Г., Савин В.Н., Рябова Е.П. *Кибернетика в сельском хозяйстве*. Л., 1965.
37. Полуэктов Р.А., Пых Ю.А., Швытов И.А. *Динамические модели экологических систем*. Л., 1980.
38. Бондаренко Н.Ф., Жуковский Е.Е., Мушкин И.Г., Нерпин С.В., Полуэктов Р.А., Усков И.Б. *Моделирование продуктивности агроэкосистем*. Л., 1982.
39. *Агрофизика от А.Ф. Иоффе до наших дней* /И.Б. Усков (ред.). СПб, 2002.
40. Глобус А.М. *Агрофизический институт 75 лет на пути к точному земледелию*. СПб, 2007.
41. Davidson J.L., Philip J.R. Light and pasture growth. In: *Climatology and microclimatology. Proc. Canberra Symp. 1956*. UNESCO, Paris, 1958: 181-187.
42. De Wit C.T., Goudriaan J., van Laar H.H., Penning de Vries F.W.T., Rabbinge R., van Keulen H., Louwerse W., Sibma L., de Jonge C. *Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops*. Wageningen, 1978.
43. Rubin J. Theoretical analysis of two-dimensional, transient flow of water in unsaturated and

- partly unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1968, 32(5): 607-615 (doi: 10.2136/sssaj1968.03615995003200050013x).
44. Ansoorge H. *Optimierte Düngungsempfehlung durch elektronische Datenverarbeitung*. Berlin, 1976.
 45. Smith M.R. A model for computer control of crop growth. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1971, 14(3): 0475-0479 (doi: 10.13031/2013.38318).
 46. Якушев В.В. *Точное земледелие: теория и практика*. СПб, 2016.
 47. Михайленко И.М. *Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями*. СПб, 2017.
 48. Balashov E., Pellegrini S., Bazzoffi P. Effects of winter wheat roots on recovery of bulk density, penetration resistance and water-stable aggregation of sandy loam Eutric Cambisol and clayey loam Vertic Cambisol after compaction. *Zemdirbyste-Agriculture*, 2021, 108(2): 99-108 (doi: 10.13080/z-a.2021.108.013).
 49. Balashov E., Mukhina I., Rizhiya E. Differences in water vapor adsorption-desorption of non aged and 3-year aged biochar in sandy Spodosols. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 2019, 22(2): 56-60 (doi: 10.2478/ahr-2019-0010).
 50. Balashov E., Pellegrini S., Bazzoffi P. Effects of repeated passages of a wheeled tractor on some physical properties of clayey loam soil. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 2021, 24(1): 9-13 (doi: 10.2478/ahr-2021-0019).
 51. Balashov E., Buchkina N., Šimanský V., Horák J. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on N₂O emissions and water availability of two soils with high water-filled pore space. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2021, 69(4): 467-474 (doi: 10.2478/johh-2021-0024).
 52. Juriga M., Aydın E., Horák J., Chlpík J., Rizhiya E.Y., Buchkina N.P., Balashov E.V., Šimanský V. The importance of initial application and reapplication of biochar in the context of soil structure improvement. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2021, 69(1): 87-97 (doi: 10.2478/johh-2020-0044).
 53. Horák J., Igaz D., Aydın E., Šimanský V., Buchkina N., Balashov E. Changes in direct CO₂ and N₂O emissions from a loam Haplic Luvisol under conventional moldboard and reduced tillage during growing season and post-harvest period of red clover. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2020, 68(3): 271-278 (doi: 10.2478/johh-2020-0023).
 54. Horák J., Balashov E., Šimanský V., Igaz D., Buchkina N., Aydın E., Bárek V., Drgoňová K. Effects of conventional moldboard and reduced tillage on seasonal variations of direct CO₂ and N₂O emissions from a loam Haplic Luvisol. *Biologia*, 2019, 74(7): 767-782 (doi: 10.2478/s11756-019-00216-z).
 55. Buchkina N., Rizhiya E., Balashov E. N₂O emission from a loamy sand Spodosol as related to soil fertility and N-fertilizer application for barley and cabbage. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2012, 58(sup1): S141-S146 (doi: 10.1080/03650340.2012.698729).
 56. Rizhiya E.Y., Horak J., Šimanský V., Buchkina N.P. Nitrogen enriched biochar-compost mixture as a soil amendment to the Haplic Luvisol: effect on greenhouse gas emission. *Biologia*, 2020, 75(6): 873-884 (doi: 10.2478/s11756-019-00335-7).
 57. Balashov E., Buchkina N., Šimanský V., Horák J. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on N₂O emissions and water availability of two soils with high water-filled pore space. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2021, 69(4): 467-474 (doi: 10.2478/johh-2021-0024).
 58. Sushko S.V., Ananyeva N.D., Ivashchenko K.V., Kudayarov V.N. Soil CO₂ emission, microbial biomass, and basal respiration of chernozems under different land uses. *Eurasian Soil Science*, 2019, 52(9): 1091-1100 (doi: 10.1134/S1064229319090096).
 59. Efimov A.E., Sidičkova Yu.R., Dobrokhotov A.V., Kozyreva L.V. Monitoring evapotranspiration in an agricultural field and determination of irrigation rates and dates by automated mobile field agrometeorological complex. *Water Resources*, 2018, 45(1): 133-137 (doi: 10.1134/S0097807818010086).
 60. Ivanov A.I., Ivanova Zh.A. Methodology of the Agrophysical Institute's modern system of field experiments. In: *Exploring and optimizing agricultural landscapes* /L. Mueller, V.G. Sychev, N.M. Dronin, F. Eulenstein (eds). Springer, Cham, 2021: 529-546 (doi: 10.1007/978-3-030-67448-9_26).
 61. Ivanov A.I., Ivanova Zh.A., Konashenkov A.A. Environmental landscape conditions of the Russian Northwest, the fertility of sod-podsolic soils and the efficiency of precise fertilizer systems. In: *Exploring and optimizing agricultural landscapes* /L. Mueller, V.G. Sychev, N.M. Dronin, F. Eulenstein (eds). Springer, Cham, 2021: 349-372 (doi: 10.1007/978-3-030-67448-9_15).
 62. Ivanov A.I., Konashenkov A.A., Ivanova, Zh. Spatial heterogeneity of lithogenic mosaic of sod-podzolic soils of chudskaya lowland and efficiency of precision fertilization system. In: *Smart innovation, systems and technologies, vol. 245* /A. Ronzhin, K. Berns, A. Kostyaev (eds.). Springer, Singapore, 2022, 245: 53-68 (doi: 10.1007/978-981-16-3349-2_5).
 63. Wiese A., Schulte M., Theuvsen L., Steinmann H.-H. Interactions of glyphosate use with farm characteristics and cropping patterns in Central Europe. *Pesticide Management Science*, 2018, 74(5): 1155-1165 (doi: 10.1002/ps.4542).
 64. Allwood J.W., Martinez-Martin P., Xu Y., Cowan A., Pont S., Griffiths I., Sungurtas J., Clarke S., Goodacre R., Marshall A., Stewart D., Howarth C. Assessing the impact of nitrogen

- supplementation in oats across multiple growth locations and years with targeted phenotyping and high-resolution metabolite profiling approaches. *Food Chemistry*, 2021, 355: 129585 (doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129585).
65. Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Lavrishchev A.V., Bure V., Saljnikov E. Magnesium leaching processes from sod-podzolic sandy loam reclaimed by increasing doses of finely ground dolomite. *Zemdirbyste-Agriculture*, 2021, 108(2): 109-116 (doi: 10.13080/z-a.2021.108.014).
 66. Чесноков Ю.В., Янко Ю.Г. Проблемы мелиорации земель Ленинградской области. *Мелиорация и водное хозяйство*, 2019, 3: 18-21.
 67. Янко Ю.Г., Петрушин А.Ф. *Методические рекомендации по обследованию осушительных мелиоративных систем дистанционными методами. Методические рекомендации*. СПб, 2019.
 68. Гулюк Г.Г., Янко Г.Г., Штыков В.И., Черняк М.Б., Петрушин А.Ф. *Руководство по мелиорации полей*. СПб, 2020.
 69. Янко Ю.Г., Петрушин А.Ф., Митрофанов Е.П., Старцев А.С., Кузенец Е.Г. Проблемы диагностики неисправностей и ремонта осушительного трубчатого дренажа. *Агрофизика*, 2020, 4: 55-59 (doi: 10.25695/AGRPH.2020.04.09).
 70. Panova G.G., Kanash E.V., Semenov K.N., Charykov N.A., Khomyakov Yu.V., Anikina L.M., Artemyeva A.M., Korniyukhin D.L., Vertebnyi V.E., Sinyavina N.G., Udalova O.R., Kulenova N.A., Blokhina S.Yu. Fullerene derivatives influence production process, growth and resistance to oxidative stress in barley and wheat plants. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*, 2018, 53(1): 38-49 (doi: 10.15389/agrobiology.2018.1.38eng).
 71. Panova G.G., Udalova O.R., Kanash E.V., Galushko A.S., Kochetov A.A., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Chernousov I.N. Fundamentals of physical modeling of "ideal" agroecosystems. *Technical Physics*, 2020, 65: 1563-1569 (doi: 10.1134/S1063784220100163).
 72. Artemyeva A.M., Sinyavina N.G., Panova G.G., Chesnokov Yu.V. Biological features of *Brassica rapa* L. vegetable leafy crops when growing in an intensive light culture. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*, 2021, 56(1): 103-120 (doi: 10.15389/agrobiology.2021.1.103eng).
 73. Kochetov A.A., Sinyavina N.G. Strategy for creating highly productive forms of small radish adapted for cultivation under artificial light conditions. *Russian Agricultural Science*, 2019, 45: 142-146 (doi: 10.3103/S1068367419020113).
 74. Kuleshova T.E., Chernousov I.N., Udalova O.R., Khomyakov Y.V., Aleksandrov A.V., Seredin I.S., Shcheglov S.A., Gall N.R., Panova G.G. Influence of lighting spectral characteristics on the lettuce leaf optical properties. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1400(3): 033025 (doi: 10.1088/1742-6596/1400/3/033025).
 75. Chesnokov Yu.V., Kanash E.V., Mirskaya G.V., Kocherina N.V., Rusakov D.V., Lohwasser U., Börner A. QTL mapping of diffuse reflectance indices of leaves in hexaploid bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Russian Journal of Plant Physiology*, 2019, 66(1): 77-86 (doi: 10.1134/S1021443719010047).
 76. Musaev F., Priyatkin N., Potrakhov N., Beletskiy S., Chesnokov Y. Assessment of *Brassicaceae* seeds quality by X-ray analysis. *Horticulturae*, 2022, 8(1): 29 (doi: 10.3390/horticulturae8010029).
 77. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., Potrakhov N.N., Gryaznov A.Y., Bessonov V.B., Obodovskii A.V., Staroverov N.E. X-ray computer methods for studying the structural integrity of seeds and their importance in modern seed science. *Technical Physics*, 2019, 64(4): 582-592 (doi: 10.1134/S1063784219040030).
 78. Chesnokov Yu.V. Biochemical markers in genetic investigations of cultivated crops: the pros and cons (review). *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*, 2019, 54(5): 863-874 (doi: 10.15389/agrobiology.2019.5.863eng).
 79. Bityutskii N.P., Yakkonen K.L., Lukina K.A., Semenov K.N., Panova G.G. Fullerene can ameliorate iron deficiency in cucumber grown hydroponically. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2021, 40: 1017-1031 (doi: 10.1007/s00344-020-10160-x).
 80. Kuleshova T.E., Gall N.R., Galushko A.S., Panova G.G. Electrogenesis in plant-microbial fuel cells in parallel and series connections. *Technical Physics*, 2021, 66(3): 496-504 (doi: 10.1134/S1063784221030142).
 81. Moustafa K. Ships as future floating farm systems? *Plant Signal Behavior*, 2018, 13(4): e1237330 (doi: 10.1080/15592324.2016.1237330).
 82. Didenko N.I., Davydenko V.A., Magaril E.R., Romashkina G.F., Skripnuk D.F., Kulik S.V. The nutrition and health status of residents of the northern regions of Russia: outlook of vertical agricultural farms. *International Journal of Environmental Research of Public Health*, 2021, 18(2): 414 (doi: 10.3390/ijerph18020414).
 83. Salgotra R.K., Stewart C.N. Jr. Functional markers for precision plant breeding. *International Journal of Molecular Science*, 2020, 21(13): 4792 (doi: 10.3390/ijms21134792).
 84. Kim H.-H., Wheeler R.M., Sager J.C., Yorio N.C., Goins G.D. Light-emitting diodes as an illumination source for plants: a review of research at Kennedy Space Center. *Habitation (Elmsford)*, 2005, 10(2): 71-78 (doi: 10.3727/154296605774791232).
 85. Uskov I.B., Yakushev V.P., Chesnokov Yu.V. Actual physical, agronomic, genetical and breeding aspects in agrobiological management (towards 85 Anniversary of Agrophysical Research Institute, Russia). *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*, 2017, 52(3): 429-436 (doi: 10.15389/agrobiology.2017.3.429eng).

- 10.15389/agrobiology.2017.3.429eng).
86. Li Z., Paul R., Ba Tis T., Saville A.C., Hansel J.C., Yu T., Ristaino J.B., Wei Q. Non-invasive plant disease diagnostics enabled by smartphone-based fingerprinting of leaf volatiles. *Nature Plants*, 2019, 5(8): 856-866 (doi: 10.1038/s41477-019-0476-y).
 87. Yaashikaa P.R., Senthil Kumar P., Varjani S., Saravanan A. Rhizoremediation of Cu(II) ions from contaminated soil using plant growth promoting bacteria: an outlook on pyrolysis conditions on plant residues for methylene orange dye biosorption. *Bioengineered*, 2020, 11(1): 175-187 (doi: 10.1080/21655979.2020.1728034).
 88. Li J.-H., Fan L.-F., Zhao D.-J., Zhou Q., Yao J.-P., Wang Z.-Y., Huang L. Plant electrical signals: A multidisciplinary challenge. *Journal of Plant Physiology*, 2021, 261: 153418 (doi: 10.1016/j.jplph.2021.153418).
 89. Shafi U., Mumtaz R., García-Nieto J., Hassan S.A., Zaidi S.A.R., Iqbal N. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications. *Sensors*, 2019, 19(17): 3796 (doi: 10.3390/s19173796).
 90. Gao D., Sun Q., Hu B., Zhang S. A framework for agricultural pest and disease monitoring based on Internet-of-Things and unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 2020, 20(5): 1487 (doi: 10.3390/s20051487).
 91. Tunca E., Köksal E.S., Çetin S., Ekiz N.M., Balde H. Yield and leaf area index estimations for sunflower plants using unmanned aerial vehicle images. *Environmental Monitoring Assessment*, 2018, 190(11): 682 (doi: 10.1007/s10661-018-7064-x).
 92. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Badenkov V.L., Matvenko D.A., Chesnokov Yu.V. Productivity based on mass calculations of the agroecosystem simulation model in geoinformation environment (review). *Sel'skokhozyaystvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*, 2020, 55(3): 451-467 (doi: 10.15389/agrobiology.2020.3.451eng).
 93. Maes W.H., Steppe K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends Plant Science*, 2019, 24(2): 152-164 (doi: 10.1016/j.tplants.2018.11.007).
 94. Ирмулатов Б.Р., Абдуллаев К.К., Комаров А.А., Якушев В.В. О перспективах прецизионного управления продуктивностью пшеницы. *Сельскохозяйственная биология*, 2021, 56(1): 92-102 (doi: 10.15389/agrobiology.2021.1.92rus).
 95. Комаров А.А., Захарян Ю.Г., Ирмулатов Б.Р. Оценка и аналитическая аппроксимация вариограмм для сельскохозяйственных полей в условиях Акмолинского региона Казахстана. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2021, 18(3): 182-191 (doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-182-191).
 96. Kostková M., Hlavinka P., Pohanková E., Kersebaum K.C., Nendel C., Gobin A., Olesen J.E., Ferrise R., Dibari C., Taká J., Topaj A., Medvedev S., Hoffmann M.P., Stella T., Balek J., Ruiz-Ramos M., Rodríguez A., Hoogenboom G., Shelia V., Ventrella D., Giglio L., Sharif B., Öztürk I., Rötter R.P., Balkovič J., Skalský R., Moriondo M., Thaler S., Žalud Z., Trnka M. Performance of 13 crop simulation models and their ensemble for simulating four field crops in Central Europe. *The Journal of Agricultural Science*, 2021, 159(1-2): 69-89 (doi: 10.1017/S0021859621000216).
 97. Martinez M.A., Priyatkin N.S., van Duijn B. Electrophotography in seed analysis: basic concepts and methodology. *Seed Testing International*, 2018, 156: 53-56.
 98. Колесников Л.Е., Попова Э.В., Новикова И.И., Прияткин Н.С., Архипов М.В., Колесникова Ю.Р., Потрахов Н.Н., van Duijn B., Гусаренко А.С. Совместное использование штаммов микроорганизмов и хитозановых комплексов для повышения урожайности пшеницы (*Triticum aestivum* L.). *Сельскохозяйственная биология*, 2019, 54(5): 1024-1040 (doi: 10.15389/agrobiology.2019.5.1024rus).
 99. Chesnokov Yu.V., Mirskaya G.V., Kanash E.V., Kocherina N.V., Rusakov D.V., Lohwasser U., Börner A. QTL identification and mapping in soft spring wheat (*Triticum aestivum* L.) under controlled agroecological and biological testing area conditions with and without nitrogen fertilizer. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2018, 65(1): 123-135 (doi: 10.1134/S102144371801003X).
 100. Babben S., Schliephake E., Janitzka P., Berner T., Keilwagen J., Koch M., Arana-Ceballos F.A., Templer S.E., Chesnokov Yu., Pshenichnikova T., Schondelmaier J., Börner A., Pillen K., Ordon F., Perovic D. Association genetics studies on frost tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) reveal new highly conserved amino acid substitutions in *CBF-A3*, *CBF-A15*, *VRN3* and *PPD1* genes. *BMC Genomics*, 2018, 19: 409 (doi: 10.1186/s12864-018-4795-6).
 101. Arif M.A.R., Shokat S., Plieske J., Ganai M., Lohwasser U., Chesnokov Yu.V., Kocherina N.V., Kulwal P., Kumar N., McGuiire P.E., Sorrells M.E., Qualset C.O., Börner A. A SNP-based genetic dissection of versatile traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *The Plant Journal*, 2021, 108(4): 960-976 (doi: 10.1111/tpj.15407).
 102. Soleimani B., Lehnert H., Babben S., Keilwagen J., Koch M., Arana-Ceballos F.A., Chesnokov Y., Pshenichnikova T., Schondelmaier J., Ordon F., Börner A., Perovic D. Genome wide association study of frost tolerance in wheat. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 5275 (doi: 10.1038/s41598-022-08706-y).
 103. Pishchik V., Mirskaya G., Chizhevskaya E., Chebotar V., Chakrabarty D. Nickel stress-tolerance in plant-bacterial associations. *Peer Journal*, 2021, 9: e12230 (doi: 10.7717/peerj.12230).
 104. Dubey S., Shri M., Gupta A., Rani V., Chakrabarty D. Toxicity and detoxification of heavy

metals during plant growth and metabolism. *Environmental Chemistry Letters*, 2018, 16: 1169–1192 (doi: 10.1007/s10311-018-0741-8).

105. Nedjimi B. Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination. *SN Applied Sciences*, 2021, 3: 286 (doi: 10.1007/s42452-021-04301-4).

ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14,
e-mail: i.b.uskov@gmail.com, vyakushev@agrophys.ru,
yuv_chesnokov@agrophys.ru ✉

Поступила в редакцию
1 февраля 2022 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2022, V. 57, № 3, pp. 403–424

90 YEARS OF AGROPHYSICAL INSTITUTE AS A HISTORY OF PRIORITY ACHIEVEMENTS IN RUSSIAN AND WORLD AGROPHYSICAL SCIENCE

I.B. Uskov, V.P. Yakushev, Yu.V. Chesnokov✉

Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail i.b.uskov@gmail.com, vyakushev@agrophys.ru, yuv_chesnokov@agrophys.ru (✉ corresponding author)

ORCID:

Uskov I.B. orcid.org/0000-0003-2990-978x

Chesnokov Yu.V. orcid.org/0000-0002-1134-0292

Yakushev V.P. orcid.org/0000-0002-0013-0484

The authors declare no conflict of interests

Received February 1, 2022

doi: 10.15389/agrobiol.2022.3.403eng

Abstract

The article described the main stages of the formation of the Agrophysical Research Institute over 90 years of its existence. Since its foundation in 1932 as part of the Lenin All-Russian Academy of Agricultural Sciences (VASKHNIL) at the initiative of Abram F. Ioffe and Nikolai I. Vavilov, the Agrophysical Institute focuses on establishing mechanisms of genotype—abiotic environment interaction in order to control the production process in agricultural plants both in the field and under controlled growing conditions. Accepting the ideas of N.I. Vavilov, A.F. Ioffe put forward the concept that the agrophysical science, relying on the achievements of physics, mathematics and biology, will ensure the transition from descriptive agronomy to agronomy based on measurements and calculations of factors of productivity, growth and development of plants and crops. This allows agricultural practitioners to manage crop formation and productivity. It is emphasized that the main objectives still are understanding the fundamentals of the functioning of agroecological systems and the development of scientific foundations, methods and means to research physical, physicochemical, biological and biophysical processes in soil—plant—active layer of the atmosphere. The research studies also aim at simulation mathematical models of these processes. The development of theoretical foundations, methods and tools for managing the productivity of agroecological systems for effective and sustainable agriculture and crop production in natural and regulated conditions are relevant. The development and creation of technical means of obtaining information about the state of plants and their habitats also are in focus. Nowadays, the Agrophysical Institute, as a leading research institute, implements scientific and technical programs and projects based on agronomic physics and related sciences, e.g., agroecology, soil science, genetics, biophysics and plant physiology, agroclimatology, computer science and computational mathematics, cybernetics and instrumentation. The Agrophysical Institute successfully develops new areas of research focused on the methods for effective management of the growth, development and productivity of crops through physical, physicochemical and other abiotic factors affecting the habitat of plants in order to modernize and intensify agriculture and the entire agro-industrial complex.

Keywords: agrophysics, development history, soil physics, soil science, precision farming, plant growth and development factors, crop productivity management.