

УДК 630*453+630*58+630*162.5+630*182.3

ВКЛАД АКАДЕМИКА А.С. ИСАЕВА В РАЗВИТИЕ ЛЕСНОЙ НАУКИ¹

© 2019 г. Д. Г. Замолодчиков^{a, b, *}, В. Г. Суховольский^c, С. А. Барталев^d, Н. В. Лукина^b

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический ф-т, Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

^bЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Россия, 117810, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

^cИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, д. 50/28

^dИнститут космических исследований РАН, Россия, 117810, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

*E-mail: dzamolod@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

После доработки 28.04.2019 г.

Принята к публикации 05.06.2019 г.

Рассмотрен вклад академика А.С. Исаева в развитие лесной науки. Наиболее существенные достижения находятся в русле четырех направлений: лесная энтомология, аэрокосмический мониторинг лесов, цикл углерода в лесах, биоразнообразие лесов. В области лесной энтомологии А.С. Исаевым с соавторами предложена феноменологическая теория динамики численности лесных насекомых. Эта теория объясняет все возможные режимы динамики численности, не требует построения конкретных математических моделей динамики численности популяции, указывает, какие ключевые характеристики динамики необходимо оценить для определения возможности и рисков вспышек массового размножения. А.С. Исаев одним из первых понял огромные возможности аэрокосмического мониторинга лесов. Им была предложена концепция многоуровневой системы дистанционного мониторинга лесов, способная решать разнообразные научные и практические задачи. Большое внимание А.С. Исаев уделил проблеме углеродного цикла лесов в связи с проблемой изменения климата. В его публикациях даны первые оценки запасов и депонирования углерода лесами России, полученные на основе лесоучетной информации. Методы расчета углеродных параметров, предложенные в этих работах, были позже закреплены в руководствах МГЭИК по составлению национальных кадастров парниковых газов. Методология мониторинга биоразнообразия лесов, разработанная под руководством академика А.С. Исаева, базируется на концептуальном подходе, учитывающем пространственно-временную динамику лесообразовательного процесса, с применением методов математического моделирования, позволяющего интерпретировать процессы и прогнозировать изменения. Данная технология обеспечивает выявление тенденций изменения породно-возрастной структуры лесов и позволяет осуществлять прогнозное моделирование их естественной и антропогенной динамики при различных режимах охраны, использования и воспроизводства.

Ключевые слова: лесной покров, лесная энтомология, динамика численности, феноменологическая модель популяции, дистанционный мониторинг лесов, карты типов лесного покрова, углеродный цикл лесов, стоки и эмиссии парниковых газов, климатические соглашения, биоразнообразие лесов, определитель типов лесов, лесная политика.

DOI: 10.1134/S0024114819050127

Вот уже год, как с нами нет выдающегося исследователя, организатора науки, государственного деятеля академика Александра Сергеевича Исаева. Время сглаживает тяжесть расставания,

но высвечивает все то, что было создано А.С. Исаевым за долгую и удивительно плодотворную жизнь в науке. Александр Сергеевич начал свою профессиональную деятельность в начале 1950-х гг. как инженер-таксатор Московской объединенной авиалесоустроительной экспедиции. Экспедиционные пути пролегали по лесам Приморья, Приамурья, Коми АССР, Карелии, Иркутской области и Красноярского края. В это время у Александра Сергеевича сформировался особый инте-

¹ Обзор выполнен в рамках темы госзадания ЦЭПЛ РАН “Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем” (номер государственной регистрации АААА-А18-118052400130-7), а также при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30015) в части раздела по дистанционному зондированию.

рес к роли лесных насекомых в формировании лесных сообществ, и он стал заочным аспирантом Всесоюзного НИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства. Диссертационная работа была направлена на исследование комплекса насекомых-ксилофагов, оказывающих негативное воздействие на ослабленный пожарами древостой лиственницы даурской в Амурской обл. Кандидатскую диссертацию он защитил в 1960 г., уже будучи сотрудником Института леса и древесины СО АН СССР. Интерес к лесной энтомологии сохранился у Александра Сергеевича на всю жизнь, его работы стали известны во всем мире и принесли ему престижные научные отечественные и международные премии.

С начала 1970-х гг. все более впечатляющими становятся достижения в освоении космического пространства. А.С. Исаев был первым, кто оценил возможности использования в лесных регионах Сибири информации, поступающей с космических аппаратов. Занимая руководящие должности в Институте леса и древесины СО АН СССР, Александр Сергеевич предложил многоуровневую программу использования космической информации для дистанционного изучения и тематического картографирования лесов для решения различных научных и лесохозяйственных задач. Свое понимание научной и практической значимости методов дистанционного зондирования лесов академик А.С. Исаев продолжил реализовывать на посту председателя Государственного комитета по лесу СССР (1988–1991 гг.), а позже и директора Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (с 1991 г.).

К концу 1980-х гг. все более очевидными становятся глобальные климатические изменения, связанные с ростом антропогенных выбросов парниковых газов. Леса являются накопителями и поглотителями парниковых газов, что способствует достижению целей международных соглашений по сохранению климата. Александр Сергеевич не мог остаться в стороне от развития новой перспективной тематики и сформировал в ЦЭПЛ РАН научную группу, занявшуюся проблемами оценки углеродного цикла лесов. Работы А.С. Исаева с соавторами стали пионерскими в данной области и заложили основы современной системы инвентаризации потоков парниковых газов в национальном лесном хозяйстве.

Умение видеть новые горизонты привело А.С. Исаева к выводу, что насущной задачей современности является углубление понимания механизмов формирования биоразнообразия лесов, а также применение в этой области различных методов исследования, включая дистанционные. Он определял основные направления исследований биоразнообразия лесов не только ЦЭПЛ РАН, но и других институтов РАН, возглавляя со-

ответствующий раздел программы Президиума РАН “Биологическое разнообразие”.

Цель настоящей работы состоит в обзоре основных научных достижений академика А.С. Исаева в области лесной энтомологии, аэрокосмического мониторинга лесов, углеродного цикла лесов в связи с климатическими изменениями и биоразнообразия лесов.

Лесная энтомология. Можно выделить следующие основные научные достижения А.С. Исаева в области лесной энтомологии (Исаев, Хлебопрос, 1973, 1974, 1977а, 1977б; Исаев, Гирс, 1975; Исаев и др., 1984, 1988, 2001, 2010, 2012б, 2014б, 2015а; Isaev et al., 2017):

- развитие методов описания динамики численности лесных насекомых, анализ причин вспышек массового размножения лесных насекомых, создание феноменологической теории динамики численности лесных насекомых;

- классификация типов динамики численности насекомых и типов вспышек массового размножения лесных насекомых;

- развитие методов системного анализа взаимодействия дерева с насекомыми-ксилофагами на примере взаимодействия черного пихтового усача с лесом;

- описание феномена скользящей устойчивости дерева к насекомым-ксилофагам;

- разработка методов оценки ландшафтной приуроченности очагов вспышек лесных насекомых.

Для того, чтобы понять, что именно было сделано А.С. Исаевым в области лесной энтомологии, необходимо понять, как описывали динамику численности насекомых примерно к 1973 г. – дате выхода первой совместной публикации в “Докладах Академии наук СССР” А.С. Исаева и Р.Г. Хлебопроса по феноменологической теории динамики численности лесных насекомых (Исаев, Хлебопрос, 1973).

Первый подход к описанию типов динамики заключался в вербальной классификации временных кривых динамики численности. Было предложено выделить три типа динамики: латентный, эпизодический и перманентный (Schwerdfeger, 1941). Схожий вариант описания типов динамики численности был предложен А.С. Рожковым (1965), предложившим классифицировать все виды на три типа: 1) виды со стабильно й численностью и ограниченным ареалом; 2) виды со значительными колебаниями численности под влиянием условий жизни; 3) виды, находящиеся на определенном уровне численности из-за контроля факторов среды и дающие вспышки массового размножения. Однако при этом оставались неясными причины возникновения вспышек. Для объяснения этого выдвигались различные гипотезы: паразитарная, климатическая и др., однако все

они были вербальными и оценить справедливость той или иной гипотезы было затруднительно.

С другой стороны, для описания динамики численности насекомых предлагалось использовать математические модели “хищник–жертва” (или “паразит–хозяин”). Но для оценки параметров таких моделей необходимы данные о динамике как популяции жертвы, так и популяции хищника (паразита). Однако технически оценить плотность популяций паразитов и хищников в лесу крайне трудно, и чаще всего таких данных в распоряжении исследователей нет. Кроме того, в ситуации, когда плотности и хищника, и жертвы поддерживаются в стационарном состоянии и возможно измерить только две величины (их плотности), оценить параметры “нуль-изоклин” модели по данным полевых измерений невозможно.

Итак, необходимо было описать механизм возникновения вспышек массового размножения лесных насекомых и верифицировать предлагаемый подход по данным только о динамике численности вида, дающего вспышку. В работах по феноменологической теории динамики численности, начиная с самой первой (Исаев, Хлебопрос, 1973) было предложено использовать системный подход к описанию регуляции и запаздывания в популяциях лесных насекомых. Такой подход позволил не собирать информацию обо всех взаимодействиях (паразиты, хищники, погода) в системе, а оценивать взаимодействия изучаемой популяции лесных насекомых с окружающей средой по характеристикам фазового портрета популяции. При этом был использован необычный подход: фактически не рассматривались математические уравнения динамики численности. Вместо этого на фазовой плоскости плотность популяции x , коэффициент размножения y из общих экологических соображений строилась картина связи плотности популяции с коэффициентом ее размножения. Фактически в основу феноменологической модели был положен анализ процесса саморегуляции популяции. При этом важнейшим показателем саморегуляции выступала величина запаздывания регулирующего механизма, его знак (положительный или отрицательный) и ее время релаксации. Создатели феноменологической теории предположили, что регулирующее действие биологических факторов определяется не плотностью данного поколения, а плотностью предыдущих генераций и взаимодействия в системе можно было классифицировать по иерархии характерных времен компонентов.

В фазовом портрете популяции как бы сфокусировано отражение воздействия лесного биогеоценоза на динамику численности вида с учетом иерархии времен различных компонентов экосистемы. Таким образом, вместо анализа **всей** системы (изучаемого вида насекомых, его парази-

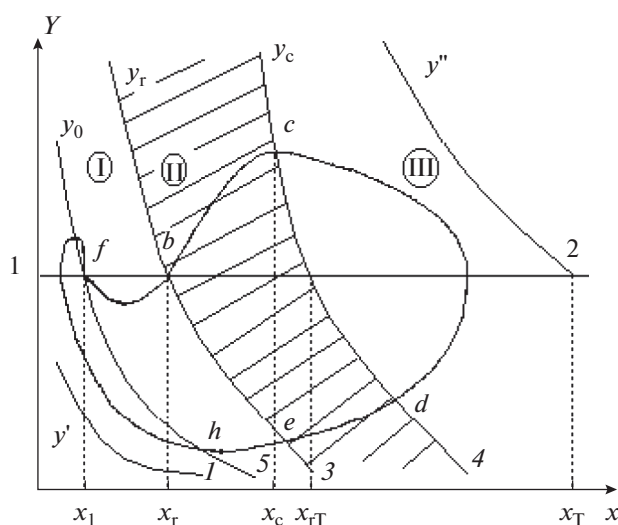


Рис. 1. Общий вид фазового портрета популяции лесного насекомого (по: Исаев, Хлебопрос, 1973).

тов и хищников, корма, климатических факторов и т.п.) можно рассматривать **отображение** взаимодействий на фазовую плоскость **только** изучаемой популяции. С учетом того, что в лесных биогеоценозах осуществляются три типа регуляции: модификация, регуляция с инерцией и без инерции, на фазовой плоскости были выделены границы разных типов взаимодействия, характеризуемых разной инерционностью и, соответственно, разным типом обратных связей (положительных и отрицательных).

В результате из общих соображений (фактически “из пальца”) были нарисованы границы существования популяции и зон, в пределах которых реализуется тот или иной тип образных связей. Переход через границу отдельной зоны приводил к изменению типа взаимодействия, знака обратной связи, величины коэффициента размножения и, соответственно, к изменению плотности популяции. На рис. 1 приведен фазовый портрет популяции, границы y' и y'' области существования популяции, границы y_r и y_c зон с разными типами регуляторных процессов в системе, траектория $fbcdf$ изменения плотности и коэффициента размножения популяции в ходе вспышки.

На такой картинке возникали ключевые точки, характеризующие изменения процессов динамики численности популяции. Если плотность популяции превосходила критическое значение x_r , отрицательная обратная связь, с помощью которой в зоне I популяция поддерживалась в плотносто-разреженном состоянии x_1 , изменялась на положительную связь в зоне II, приводящую к росту численности популяции. За счет инерции регуляторных процессов популяция увеличивала

свою плотность, попадая в зону III, где новая отрицательная обратная связь приводила к снижению плотности популяции и ее возвращению к разреженному состоянию x_1 .

Анализ свойства фазовых портретов показал, что устойчивые состояния популяции с коэффициентом размножения $y = 1$ могут располагаться на фазовой плоскости так, что будут реализовываться четыре основных типа вспышек массового размножения (о существовании различных типов вспышек массового размножения до работ А.С. Исаева и Р.Г. Хлебопроса не писал никто): фиксированная вспышка (когда наблюдаются длительные периоды подъемов численности и столь же длительные периоды, когда популяция находится в стабильно-разреженном состоянии), перманентная вспышка (частые смены разреженных и вспышечных состояний), реверсивная вспышка (когда популяция изредка попадает в состояние с очень малой плотностью), и собственно вспышка, характерная для большинства видов лесных насекомых, когда большую часть времени популяция находится в разреженном состоянии и иногда переходит во вспышечное.

Предложенный подход объяснял все возможные режимы динамики численности, не требовал построения конкретных математических моделей динамики численности популяции, указывал, какие ключевые характеристики динамики необходимо оценить для определения возможности и рисков вспышек массового размножения.

Кроме того, что теория была полезна, она оказалась еще и красивой и позволяла оценивать процессы, происходящие в экосистеме, по характеристикам только одной компоненты. При дальнейшем развитии этого подхода были развиты методы количественной оценки запаздывания регуляторных процессов в популяции, способы оценки влияния внешних факторов на популяцию, критические показатели, характеризующие смену типа регуляции плотности популяции (Исаев и др., 2015; Isaev et al., 2017).

Как получилось, что не издававшиеся к 1976 г. на английском языке работы А.С. Исаева получили мировое признание и он стал обладателем высшей награды Международного союза лесных исследовательских организаций (IUFRO)? Представляется, что в этом событии отразилось разное отношение к советской и российской науке. Сейчас общее мнение заключается в том, что для мирового признания необходимо публиковаться в англоязычных изданиях — работы только в таких изданиях читаются и могут привлечь к себе внимание. Отсюда такое внимание к спискам в Web of Science или Scopus. Во времена, когда возникла работа А.С. Исаева, ситуация была иной. Во-первых, вскоре после первой публикации в “Докладах Академии наук СССР” ведущий мировой

журнал “Nature” дал статью с детальным изложением этой работы. Во-вторых, в Библиотеке Конгресса США экспрессно была переведена русскоязычная монография А.С. Исаева и Г.И. Гирс (1975), в которой была изложена феноменологическая теория динамики численности. Этот перевод стал доступен для энтомологов США и Европы и сыграл ключевую роль в присуждении Золотой медали IUFRO. Нужно заметить, что в Библиотеке Конгресса в те времена переводились и рассылались специалистам все основные русскоязычные работы по широкому кругу тем.

Аэрокосмический мониторинг лесов. В 1971 г. директивными органами СССР было принято решение о разворачивании в стране широкомасштабных научных исследований, направленных на разработку и внедрение в практику космических методов изучения природных ресурсов Земли (Сухих, 2001). Согласно этому решению уже в 1972 г. ряд академических и отраслевых научных организаций страны приступили к исследованиям возможностей применения космических средств наблюдения для оценки лесных ресурсов. Будучи к тому времени одним из ведущих отечественных лесных энтомологов, Александр Сергеевич Исаев со своими коллегами по Институту леса и древесины имени В.Н. Сукачева СО АН СССР (г. Красноярск, далее ИЛИД СО АН СССР) провел комплекс исследований, показавших возможности применения материалов аэрокосмической съемки для решения задач лесопатологической оценки насаждений, в частности, для анализа ландшафтно-экологической приуроченности очагов сибирского шелкопряда (Исаев, Ряполов, 1976). Дальнейшее развитие этих исследований позволило разработать общие концептуальные принципы и методы лесоэнтомологического мониторинга с использованием аэрокосмических средств (Исаев, Кондаков, 1986; Ряполов, Исаев, 1988; Исаев и др., 2004; Исаев и др., 2012а).

Одновременно в период конца 1970-х — середины 1980-х гг. усилия академика А.С. Исаева в тесном сотрудничестве с д.с.-х.н. В.И. Сухих были направлены на разработку концептуальных основ космического мониторинга лесов, с учетом имевшихся к тому моменту методического инструментария и средств съемки (Исаев, Сухих, 1986). Эти основополагающие научные разработки неразрывно связали развитие аэрокосмических методов изучения лесов нашей страны с именем А.С. Исаева, ставшего не только одним из родоначальников данного направления, но и остававшегося его искренним энтузиастом все последующие годы своей профессиональной деятельности. В предисловии к книге “Спутниковое картографирование растительного покрова России” (Барталев и др., 2016) А.С. Исаев писал: “Будучи в то время директором Института леса и древесины СО АН СССР (г. Красноярск), я имел

счастье принять непосредственное участие в организации и проведении “пионерских” исследований и разработок в области дистанционного мониторинга лесов, во многом заложивших фундамент для развития этого важнейшего для нашей страны направления”.

В этот период под руководством и при непосредственном участии А.С. Исаева в Красноярском крае был проведен комплекс экспериментальных работ по изучению лесов как объекта дистанционного мониторинга, включая получение и анализ данных съемки с различных космических аппаратов с использованием материалов аэрофотосъемки, подспутникового спектрометрирования, сети таксационно-дешифровочных пробных площадей. В результате проведенных исследований была обоснована необходимость использования для изучения лесов данных космической съемки в различных спектральных диапазонах, разработаны требования к пространственной и спектральной разрешающей способности получаемых материалов, периодичности проведения наблюдений (Исаев и др., 1991). Результаты проведенных в тот период теоретических и экспериментальных исследований позволили обосновать перечень основных задач изучения лесов на основе применения дистанционного зондирования из космоса, а также разработать и внедрить в практику новые методы и технологии их мониторинга. Значительное внимание было уделено разработке применительно к условиям Красноярского края на основе данных космических съемок различных тематических мелкомасштабных карт лесов и комплекса сопряженных карт различной тематической направленности. Возглавляемый А.С. Исаевым коллектив ИЛиД СО АН СССР в это время вел интенсивные исследования по данной проблеме, став безусловным лидером в стране в области лесного тематического картографирования на основе данных дистанционного зондирования из космоса (Сухих, 2001). В это же время учеными института был выполнен большой цикл теоретических и экспериментальных работ по проблемам использования космической информации для оценки состояния лесов и охраны их от пожаров.

Таким образом, к середине 1980-х гг. под руководством академика А.С. Исаева и при его непосредственном участии были решены следующие основные задачи разработки методологии аэрокосмического мониторинга лесов:

- исследованы дешифровочные свойства доступного на то время комплекса материалов аэро- и космических съемок для изучения и мониторинга лесов;

- разработаны технические требования к средствам дистанционного зондирования лесов из космоса, развиты теоретические основы дешифрирования аэро- и космических изображений;

- разработаны теоретические основы, концептуальная структура и схема функционирования аэрокосмического мониторинга лесов;

- разработан и апробирован комплекс новых методов и технологий дистанционного изучения и картографирования лесов, оценки их состояния и динамики.

В дальнейшем, будучи назначенным в 1988 г. председателем Государственного комитета СССР по лесу, А.С. Исаев предпринял важные организационные шаги, направленные на дальнейшее развитие методов и технологий дистанционного зондирования лесов и их практическое применение в лесном хозяйстве. В частности, по его инициативе Правительством СССР было принято решение о создании Всесоюзного научно-исследовательского и информационного центра по лесным ресурсам (ВНИИЦЛесресурс), в состав которого вошел ряд уже сложившихся профильных научных подразделений Научно-исследовательской части Всесоюзного объединения “Леспроект”, работавших в области дистанционного зондирования лесов, а также специализированная Московская аэрокосмическая лесоустроительная экспедиция.

В этот же период при поддержке А.С. Исаева и под кураторством его заместителя по Государственному комитету СССР по лесу д.с.-х.н. В.И. Сухих получило активное развитие советско-американское научное сотрудничество в области дистанционного зондирования лесов. Одним из важных этапов этого сотрудничества стало проведение летом 1991 г. двух совместных международных научных экспедиций, в том числе на полигоне Национального агентства по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA), расположенном в штате Мэн (США), и на Ермаковском стационаре ИЛиД СО АН СССР в Красноярском крае. В ходе экспедиций на основе космических, воздушных, полевых и лабораторных измерений были собраны обширные экспериментальные данные об оптических характеристиках лесов в различных диапазонах спектра с целью исследования возможностей и развития методов их дистанционного мониторинга, в том числе, автоматизированной классификации лесных насаждений (Барталев и др., 1995) и раннего выявления стрессов древесной растительности под воздействием антропогенных загрязнений (Жирин и др., 1995).

Научная методология дистанционного мониторинга лесов получила новый импульс своего развития с созданием в 1991 г. Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН), основателем и первым директором которого стал академик А.С. Исаев. Во многом благодаря научному авторитету и инициативе А.С. Исаева ЦЭПЛ РАН с первых же лет своего существования начал актив-

ное развитие международного научного сотрудничества, установив тесные связи с ведущими зарубежными учеными и организациями. Был инициирован целый ряд крупных международных проектов, осуществлявшихся в рамках сотрудничества ЦЭПЛ РАН с NASA, космическим агентством Франции (CNES), Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA, Австрия). Одним из этапов развития российско-американского научного сотрудничества в области дистанционного зондирования лесов стала установка в 1993 г. при поддержке NASA на базе Института леса Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛ СО РАН, ранее ИЛИД АН СССР) станции приема и обработки данных наблюдений земной поверхности радиометром AVHRR со спутников серии NOAA. Установка в ИЛ СО РАН станции приема спутниковых данных сыграла заметную роль катализатора развития множества научных исследований и разработок в области дистанционного мониторинга лесов, в том числе, для организации оперативного мониторинга лесных пожаров и оценки их последствий (Сухинин, 1996; Ваганов и др., 1998; Пономарев, Сухинин, 2001), оценки поврежденных лесов насекомыми (Харук и др., 1998), изучения фенологических изменений растительного покрова (Шевырнов и др., 1996), решения множества других прикладных и научных задач.

Важный этап развития дистанционных методов лесозащитного мониторинга сопряжен с реализацией под руководством академика А.С. Исаева и при поддержке Всемирного банка проекта по оценке повреждений лесов сибирским шелкопрядом в результате вспышки его численности в Красноярском крае в 1993–1996 гг. В рамках проекта была проведена съемка территории поврежденных сибирским шелкопрядом лесов Красноярского края со спутника SPOT-2, создана детальная геоинформационная база данных о лесах, разработан новый метод количественной оценки степени дефолиации насаждений на основе подпиксельной декомпозиции спектральных смесей и получены детальные карты повреждений лесов насекомыми (Барталев и др., 1999). Выполненные исследования и разработки позволили впервые в практике лесопатологического мониторинга в нашей стране провести на основе анализа данных дистанционного зондирования из космоса оперативное планирование и оценку эффективности проводимых в тот период на территории Красноярского края лесозащитных мероприятий.

Существенный шаг научного развития методологии дистанционного зондирования лесов связан и с выполнением в период 1997–1999 гг. под руководством с российской стороны академика А.С. Исаева научного проекта по изучению бореальных лесных экосистем, осуществляемого

российско-американской Рабочей группой по окружающей среде под эгидой Комиссии Черно-мырдин-Гор (Джанетос и др., 1999; Isaev et al., 2002). В рамках этого проекта российские и американские ученые осуществляли совместные исследования по оценке пригодности информационных продуктов, создаваемых на основе данных космических систем национальной безопасности, для нужд мониторинга состояния бореальных лесов. Исследования были проведены на тестовых участках в западных и восточных регионах России (Московская область и Красноярский край) и в США (центральная Аляска, район г. Фэрбанкс). Был проведен сравнительный анализ точности этих продуктов в сравнении с данными наземных наблюдений на тестовых участках. Результаты исследований продемонстрировали, что информация, получаемая на основе данных космических систем национальной безопасности, может быть использована для повышения эффективности применения данных гражданских спутниковых систем. В частности, было показано, что данные систем национальной безопасности могут применяться для картографирования лесных и нелесных земель, оценки характеристик древостоев (породный состав, сомкнутость полога, группа высот), выявления изменений в лесах (включая мониторинг их долгосрочных изменений, начиная с 1960 г.), определения степени повреждений древостоев насекомыми и пожарами.

Рассматривая вклад академика А.С. Исаева в науку о лесе, нельзя не упомянуть и о разработке в начале 1990-х гг. при его непосредственном научно-методическом участии и в тесном сотрудничестве с членом-корреспондентом РАН Г.Н. Коровиным концепции лесопожарного аэрокосмического мониторинга, успешно воплощенной в жизнь к середине 2000-х гг. при создании в интересах Федерального агентства лесного хозяйства Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров (ИСДМ-Рослесхоз) (Лупян и др., 2013).

К началу 2000-х гг. в мире и в России созрели технические и методические предпосылки для реализации крупных проектов в области спутникового картографирования лесов (Исаев, Коровин, 2003). К их числу относится запуск в эксплуатацию удовлетворяющих требованиям глобального мониторинга растительности спутниковых систем, таких как SPOT-Vegetation (1998 г.) и Terra-MODIS (1999 г.). Существенное развитие получили автоматизированные технологии обработки больших объемов спутниковых данных. Появились коллективы и научные школы, способные разрабатывать методы и автоматизированные технологии спутникового картографирования лесов, применимые на больших территории-

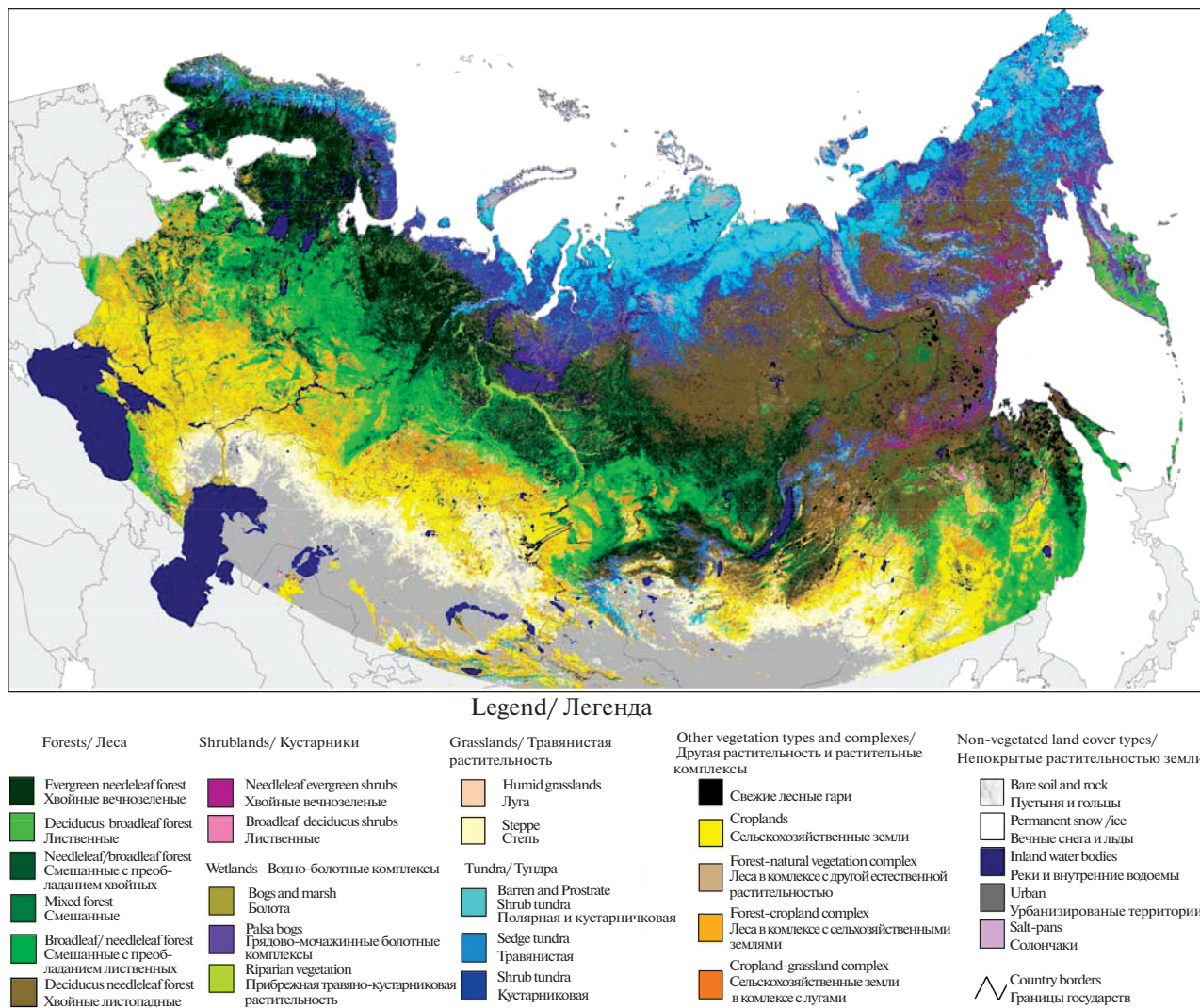


Рис. 2. Карта земного покрова Северной Евразии (по: Bartalev et al., 2003).

ях (крупные страны, континенты и планета в целом) (Барталев и др., 2011б).

Появление упомянутых выше предпосылок послужило стимулом для инициирования при научно-методическом участии и поддержке А.С. Исаева в начале 2000-х годов исследований и разработок в области спутникового картографирования лесов Северной Евразии. В этой связи необходимо упомянуть создание на основе полученных в 2000 г. данных спутниковой системы SPOT-Vegetation карты наземных экосистем Северной Евразии (Bartalev et al., 2003). В легенду указанной карты было включено 27 тематических классов, образующих семь различных групп: леса, кустарники, травянистая растительность, водно-болотные комплексы, тундра, растительные комплексы и непокрытые растительностью земли (рис. 2). Относящаяся к лесам группа представлена семью различными классами, выделенными на основе

характерных для образующих насаждения деревьев типов вегетативных органов и их фенологической динамики. Достигнутый при создании карты наземных экосистем Северной Евразии уровень тематической детальности и достоверности, а также свободный доступ к цифровой версии карты создали предпосылки для ее широкого использования в научных проектах и практических приложениях.

Фундаментальные научные взгляды академика А.С. Исаева сыграли значительную роль и в дальнейшем развитии методологии спутникового картографирования лесов, в том числе при создании карт растительного покрова, характеризующихся качественно более высокими уровнями картографической достоверности и пространственной детальности, полученных, в частности, на основе данных спектрорадиометра MODIS (Бар-

талев и др., 2011а, 2012) и системы Landsat (Ершов и др., 2015).

В последние годы своей активной профессиональной жизни Александр Сергеевич Исаев большое внимание уделял научному обобщению современных возможностей методологии дистанционного мониторинга лесов из космоса, изложению своих взглядов на пути дальнейшего ее развития и практического применения (Исаев и др., 2014а; Исаев, Черненко, 2015). В своих трудах и выступлениях он неоднократно отмечал, что для России, с ее огромной территорией в условиях недостаточной развитой инфраструктуры ряда многолесных регионов, методы дистанционного мониторинга лесов не имеют реальной альтернативы. В современных условиях крайнего дефицита актуальной и объективной информации о лесах России научное наследие и взгляды академика А.С. Исаева на развитие и практическое применение методологии спутникового мониторинга лесов приобретают особое значение.

Углеродный цикл лесов в связи с проблемой сохранения климата. С конца 1980-х гг. резко повышается научный интерес к углеродному циклу лесов в связи с проблемой антропогенного потепления климата и подготовкой Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН). В 1992 г. академик А.С. Исаев вошел в состав многочисленной делегации Российской Федерации на Всемирной конференции ООН по окружающей среде в Рио-де-Жанейро. На этой конференции была принята РКИК ООН, которая констатировала, что основной причиной современного потепления климата являются антропогенные эмиссии парниковых газов, в первую очередь связанные со сжиганием ископаемого топлива. Потепление климата негативно сказывается на существовании природы и общества, и потому необходимо принимать меры по сокращению выбросов и усилению стоков парниковых газов. В конвенции прямо говорилось о необходимости сохранения накопителей и поглотителей парниковых газов, включая леса. Развитым странам вменялось в обязанность предоставлять отчетность по источникам и стокам парниковых газов на своей территории. Таким образом, оценка углеродного бюджета лесов превратилась из научной проблемы в международное обязательство.

В 1992 г. Александр Сергеевич Исаев сформировал и возглавил творческий коллектив по инвентаризации бюджета углерода в лесах России, в который вошли член-корреспондент РАН Г.Н. Коровин, д.б.н. профессор А.И. Уткин, молодые кандидаты наук Д.Г. Замолотчиков и А.А. Пряжников. Александр Сергеевич поставил задачу – в краткие сроки получить оценки запасов и депонирования углерода лесами России. Эта задача во многом была пионерской. К тому

времени уже были опубликованы оценки для лесов бывшего СССР (Kolchugina, Vinson, 1993). В основе этой работы лежал картографический метод. Он состоял в том, что натурные оценки запасов и потоков углерода в лесных экосистемах, полученные преимущественно в период действия Международной биологической программы (1964–1974 гг.), сопоставляли с теми или иными контурами карт лесных ландшафтов. Далее средние на единицу площади значения углеродных параметров умножали на площадь контура, суммированием по всем контурам получали искомую национальную или крупнорегиональную величину. Картографический метод рассматривался как возможный и в возглавляемом А.С. Исаевым коллективе, но в итоге было решено остановиться на объемно-конверсионном методе. Суть этого метода заключается в том, что сначала определяют наборы отношений фитомассы к объемным запасам стволовой древесины в лесном насаждении. Эти отношения, называемые конверсионными коэффициентами, имеют размерность плотности, но при этом учитывают вклад в фитомассу не только ствола, но и других фракций – ветвей, листьев, корней. Объемные запасы древесины являются ключевой ресурсной характеристикой лесов, потому лесная инвентаризация одной из важнейших задач ставит наиболее точное определение запасов. Применение объемно-конверсионного метода позволило использовать для оценки запасов углерода в фитомассе лесных насаждений весь гигантский материал, накопленный лесными таксаторами России.

Второе методическое новшество, примененное коллективом под руководством академика А.С. Исаева, состояло в процедуре оценки депонирования углерода по текущему приросту. Традиционно в материалах учетов лесного фонда (ныне Государственный лесной реестр) указывали величины среднего прироста, равного отношению запаса насаждения к среднему возрасту. Однако средний прирост, при простоте расчета, не способен адекватно характеризовать увеличение объемных запасов насаждений в конкретных возрастах, особенно старших. Текущий прирост показывает увеличение запаса насаждения за последний год, но в материалах учетов лесов не приводится. Предложенная процедура состояла в расчете текущего прироста по динамике объемных запасов в последовательных возрастных группах с учетом продолжительности этих возрастных групп. Применение объемно-конверсионного метода к найденной величине текущего прироста давало оценку депонирования углерода, то есть поглощения углерода фитомассой при росте лесов.

Разработанные методы были применены к данным государственного учета лесного фонда по России в целом, а полученные результаты опубликованы в работе А.С. Исаева и др. (1993). Это

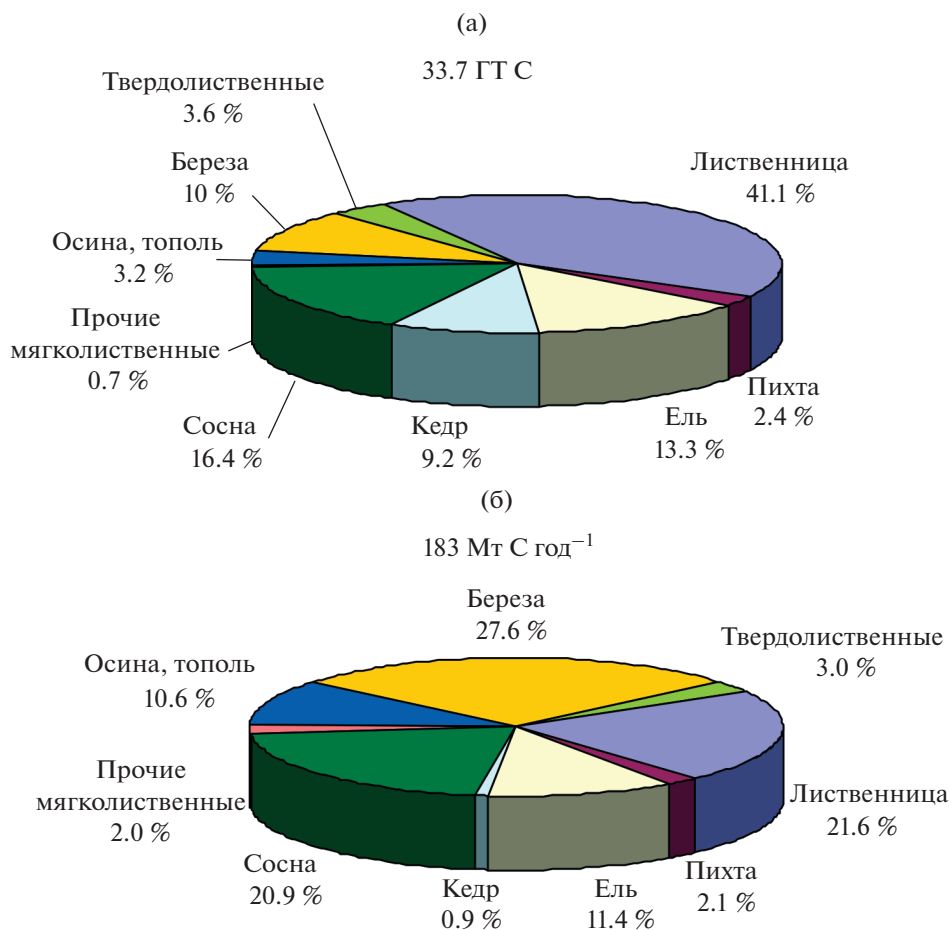


Рис. 3. Запасы (а) и депонирование (б) углерода в фитомассе лесов Российской Федерации (по: Isaev et al., 1995).

первая публикация, в которой запасы и депонирование углерода для лесов России были определены на основе “лесоводственных”, а не “продукционно-экологических” методов. В последующем изложенные выше методические подходы (опора на данные официальной лесной статистики, конверсионно-объемный метод, применение текущего прироста) стали широко использоваться для оценки параметров углеродного бюджета лесных территорий и вошли в руководства Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), регламентирующие создание национальных кадастров парниковых газов. Обновленная версия расчетов вместе с таблицей конверсионных отношений вышла в свет в 1995 г. (Isaev et al., 1995). В этой работе серьезное внимание было уделено характеристике вкладов насаждений различных доминирующих пород в запасы и депонирование углерода лесами России (рис. 3).

Дальнейшее развитие исследований углеродного цикла лесов коллективом под руководством академика А.С. Исаева шло по нескольким направлениям. Первое из них состояло в пространственной детализации углеродных оценок, снача-

ла полученных для крупных географических регионов (Европейско-Уральская часть, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток) (Исаев и др., 1995), а затем по субъектам Российской Федерации и экорегионам (Исаев, Коровин, 1999; Уткин и др., 2001). Второе направление связано с расширением охвата пулов и потоков углерода в лесах, в частности, подстилки, почвы, углеродных потерь при рубках и лесных пожарах (Исаев и др., 1995; Честных и др., 1999, 2004). Третье направление рассматривало вопросы, способствующие реализации РКИК ООН и последующих климатических соглашений. Одна из глав монографии “Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России” (Исаев и др., 1995) была посвящена институциональным основам углеродного кредита. Поскольку выбросы парниковых газов оказывают глобальное воздействие, то ограничения на выбросы должны быть установлены на уровне межгосударственных отношений. Каждое государство получает квоту на выбросы и должно обеспечить соблюдение этих квот. Одним из национальных механизмов со-

блюдения квоты может быть продажа разрешений на выбросы парниковых газов. При реализации этого механизма создаются предпосылки на углеродный кредит. Производство углеродного кредита может быть связано с мероприятиями, увеличивающими углерододепонирующий потенциал природы, в частности проектами лесовосстановления и лесоразведения. Основные институциональные условия возникновения спроса на углеродный кредит и формирование его предложения включают: 1) введение имущественных прав на углерододепонирующий потенциал природной среды; 2) создание на государственном уровне структур, защищающих имущественные права на углерододепонирующий потенциал; 3) создание рыночной инфраструктуры, которая обеспечивала бы осуществление сделок по продаже углеродного кредита. Контуры рыночной схемы обеспечения углеродного кредита так и не были реализованы в Российской Федерации, а дискуссии по оптимальным формам национального регулирования выбросов парниковых газов продолжаются и поныне, за год до вступления в действие Парижского соглашения.

Академик А.С. Исаев не только направлял научное осмысление роли лесных проектов в международном и национальном регулировании стоков и источников парниковых газов, но и способствовал осуществлению первого в Российской Федерации проекта по созданию углерододепонирующих лесных насаждений. Проект RUSAFOR-SAP был одобрен Правительством Российской Федерации, Агентством охраны окружающей среды США и включен в инициативу США по совместному осуществлению. В 1993–1994 гг. были созданы лесные насаждения в Лысогорском и Дергачевском р-нах Саратовской обл. (Исаев и др., 1995). На начало 2000-х гг. среднее депонирование диоксида углерода этими насаждениями составляло примерно $6.0 \text{ т CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ (Кравцов и др., 2002).

Итогом 20-летнего развития лесоуглеродной тематики под руководством Александра Сергеевича Исаева в Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН стала система РОБУЛ (региональная оценка бюджета углерода лесов) (Замолотчиков и др., 2011, 2013а, 2013б). Система РОБУЛ ориентирована на использование в качестве исходных данных материалов Государственного лесного реестра (ГЛР). Начальная часть расчетов состоит в оценке запасов углерода для возрастных групп лесных насаждений в дифференциации по преобладающим породам. Расчет запасов углерода в пулах фитомассы и мертвой древесины проводится на основе данных по объемным запасам стволовой древесины из материалов ГЛР с применением наборов конверсионных коэффициентов. Совершенно очевидно, что в отношении углерода фитомассы РОБУЛ использует те

самые процедуры расчета, которые были сформулированы в первой публикации коллектива под руководством А.С. Исаева (Исаев и др., 1993). Расчет запасов углерода в пулах подстилки и почвы осуществляется на основании сведений о площадях насаждений лесообразующих пород из ГЛР либо ГУЛФ с применением типовых средних значений из работ (Честных и др., 1999, 2004, 2007). Получение оценок запасов углерода в разрезе групп возраста насаждений обеспечивает возможность расчета приростов по всем углеродным пулам с использованием информации о продолжительности возрастных групп. Применение сведений о годовых площадях деструктивных нарушений (рубки, лесные пожары, прочие причины гибели лесных насаждений) к найденным запасам углерода в различных категориях лесных насаждений дает оценку годовых потерь углерода.

С 2010 г. РОБУЛ включена в Национальный кадастр парниковых газов для формирования отчетности по сектору лесного хозяйства (Национальный доклад..., 2017 и более ранние). В составе Национального кадастра система РОБУЛ подвергается регулярным проверкам экспертов РКИК ООН. Успешное прохождение этих проверок подтверждает корректность системы и ее соответствия подходам МГЭИК.

Последняя работа академика А.С. Исаева по углеродному обмену лесов была опубликована в 2017 г. в соавторстве с Д.В. Карелиным и Д.Г. Замолотчиковым (Карелин и др., 2017). В этой работе на основе натуральных исследований устанавливаются импульсные источники почвенной эмиссии диоксида углерода, к которым относятся выделение CO_2 из прикорневых участков в результате усыхания древостоя ели; увеличение почвенной эмиссии CO_2 в ответ на падение крупных стволов во время ветровалов; импульсное выделение CO_2 в результате эффекта Бёрча. Вклад этих импульсных воздействий в общий поток дыхания экосистем на региональном и глобальном уровнях может быть значительным, что требует их учета. Александр Сергеевич до самого последнего времени сохранял огромный интерес к новым идеям в лесной экологии, и потому с удовольствием поработал над текстом этой работы.

Биоразнообразие лесов. К важнейшему научному направлению, которому А.С. Исаев уделял особое внимание, относится биологическое разнообразие лесов, а именно мониторинг, сохранение и прогноз динамики экосистемного разнообразия лесов. Исследование биоразнообразия лесов проводилось под руководством А.С. Исаева институтами Российской академии наук в рамках программы Президиума РАН “Биологическое разнообразие”. Результаты научных исследований по программе отражены в коллективных монографиях “Мониторинг биологического разно-

образия лесов России: методология и методы” (2008), “Разнообразие и динамика лесных экосистем России” (в 2-х томах) (2012, 2013). В книгах обобщены результаты многолетних исследований, включая методологию мониторинга биоразнообразия на разных пространственных уровнях с использованием наземных и спутниковых данных, оценку динамики лесов под действием возмущающих природных и антропогенных факторов, инвентаризацию типологического разнообразия лесов, оценку экосистемных функций лесов.

Высокий уровень экосистемного разнообразия лесов России обусловлен сохранностью значительных массивов старовозрастных лесов на экономически недоступных и особо охраняемых природных территориях, представленных в различных природно-климатических условиях. Для оценки биоразнообразия лесных экосистем необходимо было разработать единый подход к классификации лесов. К решению этой фундаментальной задачи академиком А.С. Исаевым был привлечен коллектив специалистов высочайшего профессионального уровня под руководством известного российского ученого, главного научного сотрудника ЦЭПЛ РАН, д.б.н. Людмилы Борисовны Заугольной. В результате плодотворной многолетней работы предложен подход, основанный на синтезе доминантной и флористической классификации лесов. Разработана унифицированная классификационная система лесных сообществ на примере Европейской России и проведено сопоставление единиц разных классификационных систем с целью их использования для оценки типологической структуры лесного покрова для территорий разного масштаба (Заугольнова, Мартыненко, 2014). В основу унификации положен доминантно-групповой подход, который базируется на использовании доминантов древесного полога и соотношении эколого-ценотических групп видов нижних ярусов. Для единиц самого нижнего уровня используются также доминанты в этих ярусах. Выделены и снабжены характеристиками следующие единицы: секции, подсекции, группы типов и типы леса (ассоциации при доминантном подходе). При унификации в качестве реперов использованы единицы, выделяемые на основе флористического подхода (система Браун–Бланке). Для оценки типологического разнообразия лесов используются как единицы унифицированной классификации (группы типов леса), так и флористической классификации (ассоциации и субассоциации). Группы типов леса отражают как экологические, так и сукцессионные закономерности распределения лесных сообществ; синтаксоны флористической классификации — географические и экологические. Сопоставление единиц разных классификационных систем по эколого-ценотической структуре и экологическому диапазону служит ин-

струментом для унификации типологической схемы лесов. Создана информационная платформа “Определитель типов леса Европейской России” (2014). А.С. Исаев высоко ценил результаты данной работы, всемерно поддерживал это направление исследований биоразнообразия лесов, которое продолжает развиваться в ЦЭПЛ РАН.

Александр Сергеевич Исаев подчеркивал особую актуальность оценки и прогноза динамики экосистемного разнообразия лесов в связи с комбинированным действием антропогенных и природных факторов, включая рубки, пожары, вспышки массового размножения насекомых, грибные и бактериальные болезни, изменения климата и др. для сохранения лесов и повышения эффективности лесного хозяйства. Высокий ресурсно-экологический потенциал лесов — основа развития лесного сектора России. Однако залогом эффективного лесного хозяйства являются устойчивое, многоцелевое, неистощительное лесопользование и лесовосстановление с применением современных знаний. Эти неразрывно связанные между собой два аспекта лесного хозяйства являются важнейшими направлениями национальной лесной политики, разработанной академиком А.С. Исаевым в сотрудничестве с д.б.н., чл.-корр. РАН Георгием Николаевичем Коровиным (Исаев, Коровин, 2009).

Методология мониторинга биоразнообразия лесов, разработанная под руководством академика А.С. Исаева, базируется на концептуальном подходе, учитывающем пространственно-временную динамику лесообразовательного процесса, с применением методов математического моделирования, позволяющего интерпретировать процессы и прогнозировать изменения. Для устойчивого управления лесами используется модельный подход с учетом различных ограничений лесохозяйственного, экономического и экологического характера. Данная технология обеспечивает выявление тенденций изменения породно-возрастной структуры лесов и позволяет осуществлять прогнозное моделирование их естественной и антропогенной динамики при различных режимах охраны, использования и воспроизводства лесов. Биологическое разнообразие лесов является основой и механизмом выполняемых ими экосистемных функций, таких как регулирующие (регулирование климата, гидрологического режима, циклов углерода и элементов питания и др.), продукционные, функции формирования местообитаний и др.

В рамках реализации Программы Президиума РАН “Биологическое разнообразие” идентифицировались информативные индикаторы биоразнообразия лесов на основе не только наземных, но и спутниковых данных, перспективность использования которых в оценке и прогнозе дина-

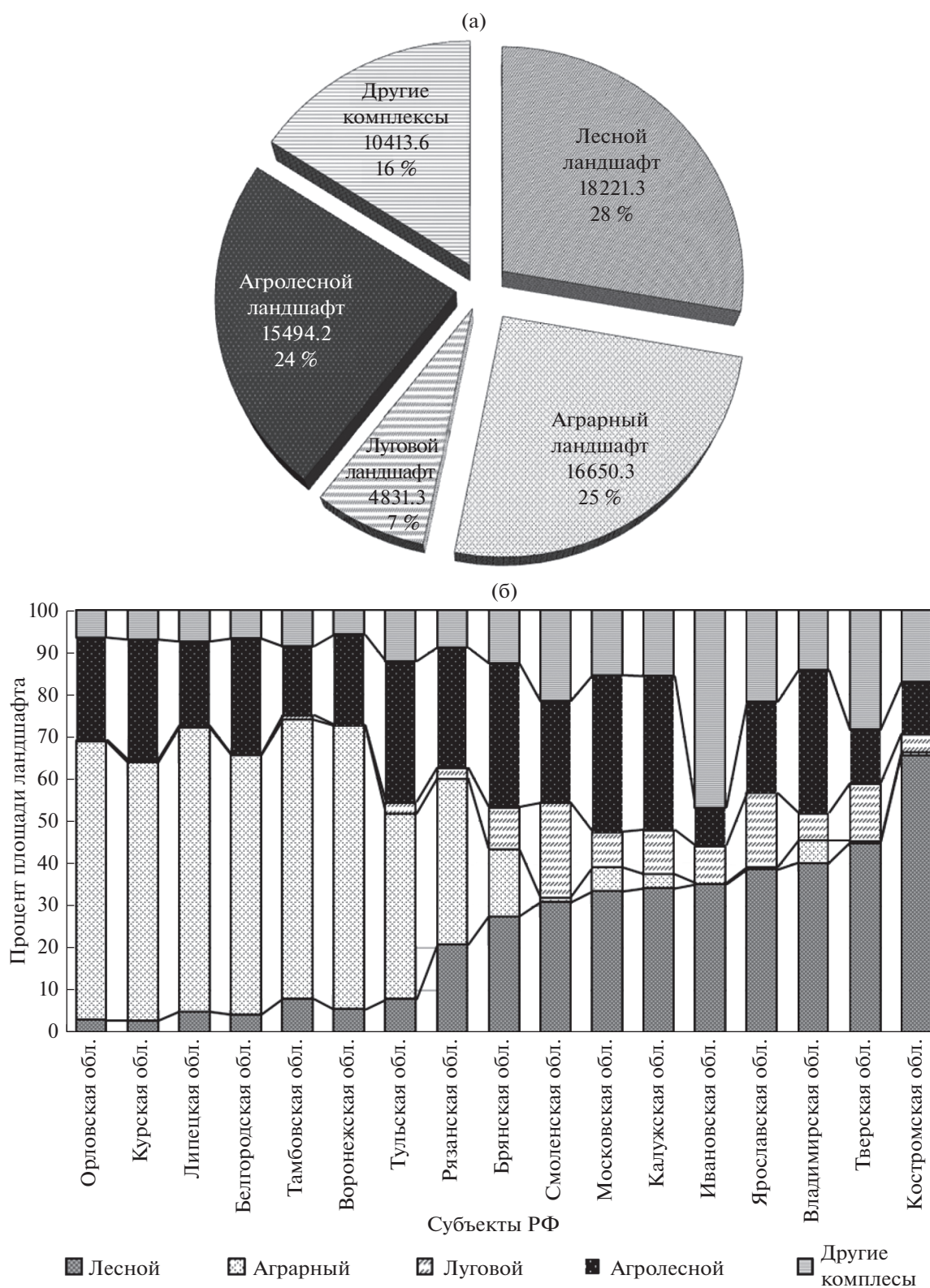


Рис. 4. Распределение площадей ландшафтов по Центральному федеральному округу (а) и по отдельным субъектам (б), ранжированным по покрытой лесом площади (по: Ершов и др., 2015).

мики лесов высоко оценивалась А.С. Исаевым. К индикаторам биоразнообразия, оцениваемым на основе спутниковых данных, относятся: площади лесов и породная структура; площади различных местообитаний/типов условий местопроизрастания; площади особо охраняемых природных территорий; площади лесов с устойчивым управлением лесными ресурсами; динамика площади лесов; динамика площади нарушенных лесов; степень фрагментации лесов и др. Данные индикаторы биоразнообразия изучались в лесах России под руководством академика А.С. Исаева.

Одним из ярких примеров является оценка биоразнообразия наземных экосистем Центрального федерального округа (ЦФО), которая выполнялась на уровне субъектов с использованием карты растительности наземных экосистем, созданной по данным высокого (30 м) пространственного разрешения серии спутников LANDSAT (Ершов и др., 2015). Для каждого субъекта оценены такие индикаторы, как площадь лесных и других наземных экосистем, количество лесных участков и средняя их площадь в субъекте, площадь нарушенных лесов за последние пять лет, доля хвойных, лиственных и смешанных лесов, общее число типов экосистем, встречающихся в субъекте. С использованием регулярной сети, размер ячейки которой соответствует среднему размеру лесного участка на карте растительности, идентифицированы доминирующие типы ландшафтов (рис. 4).

Новые подходы к мониторингу и прогнозу динамики биологического разнообразия лесов в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов на разных пространственных уровнях с использованием данных наземного и спутникового мониторинга, разработанные под руководством академика А.С. Исаева, позволяют успешно развивать фундаментальные научные направления лесной науки и решать задачи устойчивого управления лесами на основе достоверной и постоянно обновляемой информации о лесах.

Заключение. Жизнь академика А.С. Исаева является удивительным примером беззаветного служения науке и обществу. Его вклад в развитие разнообразных направлений лесной науки грандиозен. При этом это не просто свод фундаментальных знаний, но живая наука, которая способствует не только пониманию, но и охране и рациональному использованию лесных ресурсов. Александру Сергеевичу удавалось совмещать и взаимообогащать научные направления. Опыт мониторинга вспышек лесных вредителей привел к выводу о преимуществе использования аэрокосмических методов, овладение дистанционными методами позволило выстроить концепцию многоуровневого мониторинга, в которую со

временем были включены и эмиссии парниковых газов, и информация по разнообразию лесных экосистем. А.С. Исаев в бытность председателем Госкомлеса СССР старался обеспечить использование передовых достижений лесной науки в целях совершенствования лесного хозяйства страны и успел сделать многое. Он искренне переживал за критические периоды в истории лесного хозяйства новой России, потратил много сил и времени на дискуссии о необходимости совершенствования лесного законодательства РФ. Авторы настоящей статьи, которые являются учениками и последователями академика А.С. Исаева, постарались отразить масштаб его личности и роль в развитии отечественной и мировой науки о лесе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Журинов В.М., Ершов Д.В.* Сравнительный анализ данных спутниковых систем Космос-1939, SPOT и Landsat-TM при изучении бореальных лесов // Исследование Земли из космоса. 1995. № 1. С. 101–114.
- Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С.* Оценка дефолиации лесов по многоспектральным спутниковым изображениям методом декомпозиции спектральных смесей // Исследование Земли из космоса. 1999. № 4. С. 76–86.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011а. Т.8. № 4. С. 285–302.
- Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А.* Основные задачи и перспективы создания системы глобального спутникового мониторинга лесов // Лесоведение. 2011б. № 6. С. 3–15.
- Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А.* Развитие методологии спутникового картографирования лесных экосистем Северной Евразии // Разнообразие и динамика лесных экосистем России. Кн. 1. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. С. 261–286.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России // М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- Ваганов Е.А., Фуряев В.В., Сухинин А.И.* Пожары сибирской тайги // Природа. 1998. № 7. С. 87–92.
- Джанетос Э.С., Шугард Х., Орлик Б., Мэрфи Т., Касиш-ке Э., Френч Н., Стоун Т., Исаев А.С., Сухих В.И., Журинов В.М., Барталев С.А., Ершов Д.В., Шаталов А.В., Гурский М., Письменный А.Н., Зиелелис Т.А., Иванов С.В.* Исследование характеристик бореальных лесов России и США (Аляска) по снимкам, полученным системами национальной безопасности // Исследование Земли из космоса. 1999. № 6. С. 83–92.
- Ершов Д.В., Исаев А.С., Лукина Н.В., Гаврилюк Е.А., Королева Н.В.* Оценка биоразнообразия Центрального федерального округа по спутниковой карте наземных экосистем // Лесоведение. 2015. № 6. С. 403–416.
- Журинов В.М., Барталев С.А., Ершов Д.В.* Спектрометрическая оценка состояния древесных растений при мони-

- торинге лесов // Проблемы мониторинга и моделирования динамики экосистем. М.: Эколес. 1995. С. 24–42.
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л., Блинов В.Г., Дмитриев В.В., Курц В.А. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации в 1990–2050 гг.: ретроспективная оценка и прогноз // Метеорология и гидрология. 2013а. № 10. С. 73–92.
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Шуляк П.П., Честных О.В. Влияние пожаров и заготовок древесины на углеродный баланс лесов России // Лесоведение. 2013б. № 5. С. 36–49.
- Заугольнова Л.Б., Мартыненко В.Б. Определитель типов леса Европейской России. Версия 4. 2014. URL: <http://www.cepl.rssi.ru/bio/forest/index.htm>. Дата обращения 20.05.2019.
- Исаев А.С., Барталев С.А., Лупян Е.А., Лукина Н.В. Спутниковое зондирование Земли – уникальный инструмент мониторинга лесов России // Вестник Российской академии наук. 2014а. Т. 84. № 12. С. 1073–1079.
- Исаев А.С., Гирс Г.И. Взаимодействие дерева и насекомых-ксилофагов. Новосибирск: Наука, 1975. 344 с.
- Исаев А.С., Ершов Д.В., Лупян Е.А., Кобельков М.Е. Особенности организации спутникового мониторинга массового размножения вредных насекомых в лесах Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1. № 1. С. 164–174.
- Исаев А.С., Кондаков Ю.П. Принципы и методы лесозонтологического мониторинга // Лесоведение. 1986. № 4. С. 3–12.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н. Углерод в лесах Северной Евразии // Кружоворот углерода на территории России. М.: Министерство науки и технологий Российской Федерации, 1999. С. 63–95.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н. Крупномасштабные изменения в бореальных лесах Евразии и методы их оценки с использованием космической информации // Лесоведение. 2003. № 2. С. 3–9.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н. Актуальные проблемы национальной лесной политики. М.: Центр экологической политики России, 2009. 105 с.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И., Титов С.П., Уткин А.И., Голуб А.А., Замолодчиков Д.Г., Пряжников А.А. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. М.: Центр экологической политики, 1995. 156 с.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Пряжников А.А., Замолодчиков Д.Г. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России // Лесоведение. 1993. № 5. С. 3–10.
- Исаев А.С., Лямцев Н.И., Ершов Д.В. Контроль численности лесных насекомых в системе лесозонтологического мониторинга // Разнообразие и динамика лесных экосистем России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012а. Кн. 1. С. 383–421.
- Исаев А.С., Овчинникова Т.М., Пальникова Е.Н., Суховольский В.Г., Тарасова О.В., Хлебопрос Р.Г. Динамика численности и устойчивость популяций лесных насекомых на низком уровне плотности // Лесоведение. 2014б. № 4. С. 3–11.
- Исаев А.С., Пальникова Е.Н., Суховольский В.Г., Тарасова О.В. Динамика численности лесных насекомых-филофагов: модели и прогнозы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 276 с.
- Исаев А.С., Рожков А.С., Киселев В.В. Черный пихтовый усач *Monochamus urussovi* (Fisch.). Новосибирск: Наука, 1988. 269 с.
- Исаев А.С., Ряполов В.Я. Анализ ландшафтно-экологической приуроченности очагов сибирского шелкопряда с применением аэрокосмической съемки // Исследование таежных ландшафтов дистанционными методами. Новосибирск: Наука, 1979. С. 152–167.
- Исаев А.С., Сухих В.И. Аэрокосмический мониторинг лесных ресурсов // Лесоведение. 1986. № 6. С. 11–21.
- Исаев А.С., Сухих В.И., Калашников Е.Н. и др. Аэрокосмический мониторинг лесов / Под ред. А.С. Исаева, В.И. Сухих. М.: Наука, 1991. 240 с.
- Исаев А.С., Суховольский В.Г., Овчинникова Т.М., Ковалев А.В., Пальникова Е.Н., Тарасова О.В. Экологический риск вспышек массового размножения лесных насекомых, моделирование и принятие решений в задачах лесозащиты // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012б. Вып. 200. С. 173–184.
- Исаев А.С., Суховольский В.Г., Хлебопрос Р.Г. Метамодельные подходы к описанию критических явлений в лесных экосистемах // Лесоведение. 2010. № 2. С. 3–13.
- Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г. Принцип стабильности в динамике численности лесных насекомых // Доклады Академии наук СССР. 1973. Т. 208. Вып. 1. С. 225–228.
- Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г. Анализ динамики численности лесных насекомых на основе принципа стабильности подвижных экологических систем // Журн. общей биологии. 1974. Т. 35. Вып. 5. С. 737–774.
- Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г. Эффекты запаздывания в регуляции численности лесных насекомых // Доклады Академии наук СССР. 1977а. Т. 232. Вып. 6. С. 1448–1451.
- Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г. Инерционные и безынерционные механизмы регуляции численности лесных насекомых // Проблемы лесоведения Сибири. М.: Наука, 1977б. С. 183–203.
- Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г., Кондаков Ю.П., Недорезов Л.В., Киселев В.В., Суховольский В.Г. Популяционная динамика лесных насекомых. М.: Наука, 2001. 374 с.
- Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г., Недорезов Л.В., Кондаков Ю.П., Киселев В.В. Динамика численности лесных насекомых. Новосибирск: Наука, 1984. 223 с.
- Исаев А.С., Черненко Т.В. Уникальность современного этапа дистанционного зондирования лесов России // Сибирский лесной журнал. 2015. № 5. С. 26–41.
- Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Исаев А.С. Малоизвестные импульсные составляющие почвенной эмиссии диоксида углерода в таежных лесах // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 4. С. 473–476.
- Кравцов С.З., Мелочников А.С., Доронин К.М. Десять лет международному российско-американскому проекту RUSAFOR-SAP по созданию новых углеродоемких лесов в Саратовской области. Саратов: СГТУ, 2002. 42 с.
- Лупян Е.А., Ершов Д.В., Барталев С.А., Исаев А.С. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров и их последствий: результаты последнего десятилетия и перспективы // Доклады V Всероссийской конференции (с международным участием), посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина “Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении,

- лесном хозяйстве и экологии”, Москва, 22-24 апреля 2013 г. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 43–47.
- Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / Под ред. А.С. Исаева. М.: Наука, 2008. 453 с.
- Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2016 гг. Часть 1. Москва, 2018. 470 с. URL: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/rus-2018-nir-14ap18.zip>. Дата обращения 20.05.2019.
- Пономарев Е.И., Сухинин А.И. Использование информации с ИСЗ NOAA для пространственной оценки пожарной опасности лесных территорий // Сибирский экологический журнал. 2001. № 5. С. 577–589.
- Разнообразии и динамика лесных экосистем России. / Под ред. А.С. Исаева. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. Кн. 1. 460 с.
- Разнообразии и динамика лесных экосистем России. / Под ред. А.С. Исаева. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. Кн. 2. 478 с.
- Рожков А.С. Массовое размножение сибирского шелкопряда и меры борьбы с ним. М.: Наука, 1965. 178 с.
- Ряполов В.Я., Исаев А.С. Дистанционные методы контроля и прогноза лесоэнтомологического состояния таежных территорий // Исследование Земли из космоса. 1988. № 1. С. 48–55.
- Сухинин А.И. Система космического мониторинга лесных пожаров в Красноярском крае // Сибирский экологический журнал. 1996. № 1. С. 85–91.
- Сухих В.И. Становление космических методов в лесном хозяйстве России // Лесное хозяйство. 2001. № 2. С. 6–11.
- Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Коровин Г.Н., Зукерт Н.В. Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.
- Харук В.И., Исаев А.С., Кожуховская А.Г. Возможности применения съемки спутников NOAA для мониторинга катастрофических повреждений лесов насекомыми // Лесоведение. 1998. № 4. С. 20–25.
- Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
- Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Распределение запасов органического углерода в почвах лесов России // Лесоведение. 1999. № 2. С. 13–21.
- Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
- Шевырногов А.П., Сухинин А.И., Кашкин В.Б., Сидько А.Ф., Высоцкая Г.С. Научная программа “Зеленая волна” как средство изучения растительности Красноярского края космическими средствами // Сибирский экологический журнал. 1996. № 5. С. 363–372.
- Bartalev S.A., Belward A., Ershov D.V., Isaev A.S. A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia // International J. Remote Sensing. 2003. V. 24. № 9. P. 1977–1982.
- Isaev A.S., Korovin G.N., Bartalev S.A., Ershov D.V., Janetos A.C., Kasischke E.S., Shugart H.H., French N.H.F., Orlick B.E., Murphy T.L. Using remote sensing to assess Russian forest fire carbon emissions // Climate Change. 2002. V. 55. P. 235–249.
- Isaev A., Korovin G., Zamolodchikov D., Utkin A., Pryaznikov A. Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests // Water, Air and Soil Pollution. 1995. V. 82. I. 1–2. P. 247–256.
- Isaev A.S., Soukhovolsky V.G., Tarasova O.V., Palnikova E.N., Kovalev A.V. Forest Insect Population Dynamics, Outbreaks and Global Warming Effects. N.Y.: J. Wiley and Sons, 2017. 298 p.
- Kolchugina T.P., Vinson T.S. Carbon sources and sinks in forest biomes of the former Soviet Union // Global biogeochemical cycles. 1993. V. 7. № 2. P. 291–304.
- Schwerdtfeger F. Über die Ursachen des Massenwechsels der Insecten // Z. Angev. Entom. 1941. Bd. 28. № 2–3. S. 254–303.

Contribution of Academician A.S. Isaev to Advancement of Forest Science

D. G. Zamolodchikov^{1, 2, *}, V. G. Sukhovol'skii³, S. A. Bartalev⁴, and N. V. Lukina²

¹Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1 bldg. 12, Moscow 119991 Russia

²Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

³Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Academgorodok 50 bldg. 28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

⁴Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya st. 84/32, Moscow 117997 Russia

*E-mail: dzamolod@mail.ru

Received 18 March 2019

Edited 28 April 2019

Accepted 5 June 2019

The contribution of academician A.S. Isaev to advancement of forest science is considered. The most significant achievements were in the spheres of forest entomology, aerospace monitoring of forests, forest carbon cycle and forest biodiversity. A.S. Isaev and coauthors have put forward phenomenological theory of population dynamics of forest insects. It encompasses all possible types of population dynamics, it does not demand the specific mathematical models of population dynamics and points at the key features, controlling the probability and risks of the outbreaks. A.S. Isaev was among the pioneers of aerospace monitoring of forests. He proposed the concept of multi-layered system of the remote monitoring of forests to address various research and applied demands. A.S. Isaev have payed high attention to forest carbon cycle associated to the challenges of climate change. He have published the first estimates of the forest carbon storage and deposition

in Russia based on the forest inventory data. The methods of accounting of carbon were later included in technical guidance of the IPCC on the National Reporting on Inventory of Greenhouse Gases. The technology of monitoring of biodiversity of forest developed under the supervision of academician A.S. Isaev takes into account spatiotemporal dynamics of forest forming processes, applies mathematical modeling of processes and forecasts changes. It allows deciphering the trends in species and age structure of forests and model predictions of natural and human-induced dynamics under different protection, exploitation and regeneration.

Keywords: forest cover, forest entomology, population dynamics, phenomenological model, populations, remote monitoring of forests, maps of forest cover types, carbon cycle of forests, sinks and sources of greenhouse gases, climate agreements, biodiversity of forests, key to forest types, forest policy.

Acknowledgements: This review is published in the framework of the State Assignment "Methodology of assessment of the structural organization and functioning of forest ecosystems" (project no. AAAA-A18-118052400130-7) to the Center of forest ecology and productivity, Russian Academy of Sciences, with the support from the Russian Science Foundation (project no. 19-77-30015) on remote sensing topic.

REFERENCES

- Bartalev S.A., Belward A.S., Ershov D.V., Isaev A.S., A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia, *International Journal of Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, No. 9, pp. 1977–1982.
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometrii MODIS (Satellite mapping of the Russian plant cover by spectral radiometer MODIS), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Satellite mapping of vegetation cover of Russia), Moscow: Izd-vo IKI RAN, 2016, 208 p.
- Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Otsenka defoliatsii lesov po mnogospektral'nym sputnikovym izobrazheniyam metodom dekompozitsii spektral'nykh smesei (Spectral decomposition-based assessment of forest defoliation from multispectral satellite images), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1999, No. 4, pp. 78–86.
- Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.A., Osnovnye zadachi i perspektivy sozdaniya sistemy global'nogo sputnikovogo monitoringa lesov (The main problems and perspectives of developing a system of global satellite monitoring of forests), *Lesovedenie*, 2011, No. 6, pp. 3–15.
- Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.A., Razvitiye metodologii sputnikovogo kartografirovaniya lesnykh ekosistem Severnoi Evrazii (Development of methodology of satellite mapping of forest ecosystems in Northern Eurasia), In: *Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii (Diversity and dynamics of forest ecosystems in Russia)* Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2012, Vol. 1, pp. 261–286 (460 p.).
- Bartalev S.A., Zhirin V.M., Ershov D.V., The comparative analysis of "Kosmos-1939", Spot and "LANDSAT-TM" Satellite systems data for boreal forests study, *Earth observation and remote sensing*, 1995, Vol. 13, No. 1, pp. 129–141.
- Chestnykh O.V., Lyzhin V.A., Koksharova A.V., Zapasy ugleroda v podstilkakh lesov Rossii (The carbon reserves in litters of forests in Russia), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 114–121.
- Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Obshchie zapasy biologicheskogo ugleroda i azota v pochvakh lesnogo fonda Rossii (Total storages of biogenic carbon and nitrogen in soils of the forest fund of Russia), *Lesovedenie*, 2004, No. 4, pp. 30–42.
- Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N., Raspredeleniye zapasov organicheskogo ugleroda v pochvakh lesov Rossii (Distribution of organic carbon storages in forest soils in Russia), *Lesovedenie*, 1999, No. 2, pp. 13–21.
- Ershov D.V., Isaev A.S., Lukina N.V., Gavriluk E.A., Koroleva N.V., Otsenka bioraznoobraziya Tsentral'nogo federal'nogo okruga po sputnikovoi karte nazemnykh ekosistem (Biodiversity estimate for the Central Federal District from satellite map of terrestrial ecosystems), *Lesovedenie*, 2015, Vol. 6, pp. 403–416. <https://unfccc.int/documents/65719>, (16 May 2019).
- Isaev A., Korovin G., Zamolodchikov D., Utkin A., Pryaznikov A., Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests, *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, Vol. 82, No. 1, pp. 247–256.
- Isaev A.S., *Monitoring biologicheskogo raznoobraziya lesov Rossii: metodologiya i metody* (Monitoring of the biological diversity of the forests of Russia: methodology and approaches), Moscow: Nauka, 2008, 453 p.
- Isaev A.S., *Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii* (Forest ecosystems of Russia: diversity and dynamics), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2012, Vol. 1, 460 p.
- Isaev A.S., *Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii* (Forest ecosystems of Russia: diversity and dynamics), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2013, Vol. 2, 478 p.
- Isaev A.S., Chernenkova T.V., Unikal'nost' sovremennogo etapa distantsionnogo zondirovaniya lesov Rossii (The uniqueness of the contemporary stage of forest remote sensing in Russia), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2015, No. 5, pp. 26–41.
- Isaev A.S., Ershov D.V., Lupyan E.A., Kobel'kov M.E., Osobennosti organizatsii sputnikovogo monitoringa massovogo razmnozheniya vrednykh nasekomykh v lesakh Sibiri, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 1, No. 1, pp. 164–174.
- Isaev A.S., Girs G.I., *Vzaimodeistvie dereva i nasekomykh-ksilofagov* (Interactions between the tree and the xylophage insects), Novosibirsk: Nauka, 1975, 344 p.

- Isaev A.S., Khlebopros R.G., Analiz dinamiki chislennosti lesnykh nasekomykh na osnove printsipa stabil'nosti podvizhnykh ekologicheskikh sistem (Analysis of population dynamics of forest insects based on the principle of stability of unsteady ecosystems), *Zhurnal obshchei biologii*, 1974, Vol. 35, No. 5, pp. 737–774.
- Isaev A.S., Khlebopros R.G., Effekty zapazdyvaniya v regulatsii chislennosti lesnykh nasekomykh (Effects of retardation controls population of forest insects), *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1977, Vol. 232, No. 6, pp. 1448–1451.
- Isaev A.S., Khlebopros R.G., Inertsionnye i bezynertsionnye mekhanizmy regulatsii chislennosti lesnykh nasekomykh (Inertial and non-inertial mechanisms of population control of forest insects), In: *Problemy lesovedeniya Sibiri (Challenges in forest science of Siberia)* Moscow: Nauka, 1977, pp. 183–203 (258 p.).
- Isaev A.S., Khlebopros R.G., Printsip stabil'nosti v dinamike chislennosti lesnykh nasekomykh, *Doklady Akademii nauk*, 1973, Vol. 208, No. 1, pp. 225–228.
- Isaev A.S., Khlebopros R.G., Kondakov Y.P., Nedorezov L.V., Kiselev V.V., Sukhovol'skii V.G., *Populyatsionnaya dinamika lesnykh nasekomykh (Population dynamics of the forest insects)*, Moscow: Nauka, 2001, 373 p.
- Isaev A.S., Khlebopros R.G., Nedorezov L.V., Kondakov Y.P., Kiselev V.V., *Dinamika chislennosti lesnykh nasekomykh (Population dynamics of forest insects)*, Novosibirsk: Nauka, 1984, 223 p.
- Isaev A.S., Kondakov Y.P., Printsipy i metody lesoentomologicheskogo monitoringa (Principles and methods of the forest entomological monitoring), *Lesovedenie*, 1986, No. 4, pp. 3–12.
- Isaev A.S., Korovin G.N., *Aktual'nye problemy natsional'noi lesnoi politiki (Recent challenges of the national forest policy)*, Moscow: LEVKO – Institut ustoychivogo razvitiya/Tsentr ekologicheskoi politiki Rossii, 2009, 108 p.
- Isaev A.S., Korovin G.N., Krupnomasshtabnye izmeneniya v boreal'nykh lesakh Evrazii i metody ikh otsenki s ispol'zovaniem kosmicheskoi informatsii (Large-scale changes in Eurasian boreal forests and methods of their assessment using space information), *Lesovedenie*, 2003, No. 2, pp. 3–9.
- Isaev A.S., Korovin G.N., Uglerod v lesakh Severnoi Evrazii (Carbon in forests of Northern Eurasia), In: *Krugovorot ugleroda na territorii Rossii (Carbon cycle on the territory of Russia)*, Moscow: Minnauki Rossii, 1999, pp. 63–95 (329 p.).
- Isaev A.S., Korovin G.N., Ershov D.V., Bartalev S.A., Janetos A., Kasischke E.S., Shugart H.H., French N.H.F., Orlick B.E., Murphy T.L., Using remote sensing to assess Russian forest fire carbon emissions, *Climatic Change*, 2002, Vol. 55, No. 1–2, pp. 235–249.
- Isaev A.S., Korovin G.N., Sukhikh V.I., Titov S.P., Utkin A.I., Golub A.A., Zamolodchikov D.G., Pryazhnikov A.A., *Ekologicheskie problemy pogloshcheniya uglekisllogo gaza posredstvom lesovosstanovleniya i lesorazvedeniya v Rossii (Environmental challenges of carbon dioxide absorption following reforestation and afforestation in Russia)*, Moscow: Tsentr ekologicheskoi politiki, 1995, 155 p.
- Isaev A.S., Korovin G.N., Utkin A.I., Pryazhnikov A.A., Zamolodchikov D.G., Otsenka zapasov i godichnogo doponirovaniya ugleroda v fitomasse lesnykh ekosistem Rossii (Storages and annual deposition of carbon in forest phytomass of Russia), *Lesovedenie*, 1993, No. 5, pp. 3–10.
- Isaev A.S., Lyamtsev N.I., Ershov D.V., Kontrol' chislennosti lesnykh nasekomykh v sisteme lesoentomologicheskogo monitoringa (Regulation of the forest insect population as a part of the system of entomological monitoring of forests), In: *Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii (Forest ecosystems of Russia: diversity and dynamics)*, Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2012, Vol. 1, pp. 383–421 (460 p.).
- Isaev A.S., Ovchinnikova T.M., Pal'nikova E.N., Soukhovolsky V.G., Tarasova O.V., Khlebopros R.G., Populatsionnaya dinamika i stabil'nost' populatsii lesnykh nasekomykh s nizkoy plotnost'yu (using the example of populations of the bordered white *Bupalus piniarius* L.), *Contemporary problems of ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 733–742.
- Isaev A.S., Pal'nikova E.N., Sukhovol'skii V.G., Tarasova O.V., *Dinamika chislennosti lesnykh nasekomykh-fillofagov: modeli i prognozy (Population dynamics of forest phyllophagous insects: Models and forecasts)*, Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2015, 262 p.
- Isaev A.S., Rozhkov A.S., Kiselev V.V., *Chernyi pikhtoviy usach: Monochamus urusovi (Fisch.) (Monochamus urusovi (Fisch.))*, Novosibirsk: Nauka, 1988, 270 p.
- Isaev A.S., Ryapolov V.Y., Analiz landshaftno-ekologicheskoi priurochennosti ochagov sibirskogo shelkopryada s primeneniem aerokosmicheskoi s'emki (Landscape and ecological associations of the centers of outbreaks of white-lined silk moth using aerial and space imagery), In: *Issledovanie taezhnykh landshaftov distantsionnymi metodami (Study of forest landscapes with remote techniques)* Novosibirsk: Nauka, 1979, pp. 152–167 (216 p.).
- Isaev A.S., Soukhovolsky V.G., Khlebopros R.G., Model approaches to description of critical phenomena in forest ecosystems, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 699–705.
- Isaev A.S., Soukhovolsky V.G., Tarasova O.V., Palnikova E.N., Kovalev A.V., *Forest insect population dynamics, outbreaks and global warming effects*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2017, 286 p.
- Isaev A.S., Sukhikh V.I., Aerokosmicheskii monitoring lesnykh resursov (Aerospace monitoring of forest resources), *Lesovedenie*, 1986, No. 6, pp. 11–21.
- Isaev A.S., Sukhikh V.I., Kalashnikov E.N., *Aerokosmicheskii monitoring lesov (Aerospace monitoring of forests)*, Moscow: Nauka, 1991, 240 p.
- Isaev A.S., Sukhovol'skii V.G., Ovchinnikova T.M., Kovalev A.V., Pal'nikova E.N., Tarasova O.V., Ekologicheskii risk vspyshek massovogo razmnozheniya lesnykh nasekomykh, modelirovanie i prinyatie reshenii v zadachakh lesozashchity (Ecological risk of forest insect outbreaks, modeling and decision-making in the tasks of forest protection), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2012, No. 200, pp. 173–184.
- Janetos E.S., Shugart H., Oblick B., Murphy T., Kasischke E., French N., Stone T., Isaev A.S., Sukhikh V.I., Zhirin V.M., Bartalev S.A., Ershov D.V., Shatalov A.V., Gurskits M.N., Pis'mennyyi A.N., Ziemelis T.A., Ivanov S.V., *Issledovanie kharakteristik boreal'nykh lesov Rossii i SShA (Al'yaska) po snimkam, poluchennym sistemami natsional'noi bezopasnosti (Research of Russian and U.S. Alaska boreal forests, using the images from National Security Systems)*, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1999, No. 6, pp. 83–92.
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Isaev A.S., Unconsidered sporadic sources of carbon dioxide emission from soils

- in taiga forests, *Doklady Biological Sciences*, 2017, Vol. 475, No. 1, pp. 165–168.
- Kharuk V.I., Isaev A.S., Kozhukhovskaya A.G., Vozmozhnosti primeneniya s"emki sputnikov NOAA dlya monitoringa katastroficheskikh povrezhdenii lesov nasekomymi (Perspectives of application of NOAA satellite imagery in monitoring of disastrous forest disturbance by insects), *Lesovedenie*, 1998, No. 4, pp. 20–25.
- Kolchugina T.P., Vinson T.S., Carbon sources and sinks in forest biomes of the former Soviet Union, *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, Vol. 7, No. 2, pp. 291–304.
- Kravtsov S.Z., Melochnikov A.S., Doronin K.M., *Desyat' let mezhdunarodnomu rossiisko-amerikanskomu projektu RUSAFOR-SAP po sozdaniyu novykh uglerodoemkikh lesov v Saratovskoi oblasti* (Decade anniversary of the International Russian-American project RUSAFOR-SAP which has initiated new carbon-rich forests in Saratov Oblast), Saratov: Izd-vo SGTU, 2002, 42 p.
- Loupian E.A., Ershov D.V., Bartalev S.A., Isaev A.S., Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov i ikh posledstviy: rezul'taty poslednego desyatiletia i perspektivy (Information system for remote monitoring of forest fires and their consequences: The results of the last decade and further prospects), *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii i lesnom khozyaistve (Aerospace methods and geoinformational technologies in forest science and forestry)*, Moscow, 22–24 April 2013, Moscow: Izd-vo TsEPL RAN, 2013, pp. 40–43.
- Ponomarev E.I., Sukhinin A.I., Ispol'zovanie informatsii s ISZ NOAA dlya prostranstvennoi otsenki pozharnoi opasnosti lesnykh territorii (Application of ISS NOAA to spatial assessment of forest fire hazard), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2001, No. 5, pp. 577–589.
- Rozhkov A.S., *Massovoe razmnozhenie sibirskogo shelkopryada i metody bor'by s nim* (Siberian moths outbreaks and the control measures), Moscow: Nauka, 1965, 180 p.
- Ryapolov V.Y., Isaev A.S., Distantsionnye metody kontrolya i prognoza lesoentomologicheskogo sostoyaniya taezhnykh territorii (Remote techniques of control and forecast of forest entomological state in taiga), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1988, No. 1, pp. 48–55.
- Schwerdtfeger F., Über die Ursachen des Massenwechsels der Insekten, *Zeitschrift für Angewandte Entomologie*, 1941, Vol. 28, No. 2–3, pp. 254–303.
- Shevyrnogov A.P., Sukhinin A.I., Kashkin V.B., Sid'ko A.F., Vysotskaya G.S., Nauchnaya programma "Zelenaya volna" kak sredstvo izucheniya rastitel'nosti Krasnoyarskogo kraia kosmicheskimi sredstvami ("Green wave" research program to study vegetation of Krasnoyarsk krai with space techniques), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1996, No. 5, pp. 363–372.
- Sukhikh V.I., Stanovlenie kosmicheskikh metodov v lesnom khozyaistve Rossii (Development of space techniques in forest sector of Russia), *Lesnoe khozyaistvo*, 2001, No. 2, pp. 6–11.
- Sukhinin A.I., Sistema kosmicheskogo monitoringa lesnykh pozharov v Krasnoyarskom krae (System of space monitoring of forest fires in Krasnoyarsk krai), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1996, No. 1, pp. 85–91.
- Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Korovin G.N., Zukert N.V., Lesa Rossii kak rezervuar organicheskogo ugleroda biosfery (Forests of Russia as the pool of organic carbon in biosphere), *Lesovedenie*, 2001, No. 5, pp. 8–23.
- Vaganov E.A., Furyaev V.V., Sukhinin A.I., Pozhary sibirskoi taigi (Fires in siberian taiga), *Priroda*, 1998, No. 7, pp. 51–62. www.cepl.rssi.ru/bio/forest/, (16 May 2019).
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Gitarskii M.L., Blinov V.G., Dmitriev V.V., Kurz W.A., Korovin G.N., Carbon budget of managed forests in the Russian Federation in 1990–2050: Post-evaluation and forecasting, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, Vol. 38, No. 10, pp. 701–714.
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N., A twenty year retrospective on the forest carbon dynamics, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 706–715.
- Zamolodchikov D.G., Grabovsky V.I., Shulyak P.P., Chestnykh O.V., The impacts of fires and clear-cuts on the carbon balance of Russian forests, *Contemporary problems of ecology*, 2013, Vol. 6, No. 7, pp. 714–726.
- Zhirin V.M., Bartalev S.A., Ershov D.V., Spektrometricheskaya otsenka sostoyaniya drevesnykh rastenii pri monitoringe lesov (Spectrometric estimation of the health of wooden plants for forest monitoring), In: *Problemy monitoringa i modelirovaniya dinamiki ekosistem* (Issues of monitoring and modeling of ecosystem dynamics), Moscow: Ekoles, 1995, pp. 24–42 (351 p.)