

На правах рукописи



Созинов Олег Викторович

**ФИТОИНДИКАЦИЯ В БОТАНИЧЕСКОМ РЕСУРСОВЕДЕНИИ:
КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ НА ЭКОЛОГО-ЦЕНОТИЧЕСКИХ
ГРАДИЕНТАХ**

03.02.08 – «Экология (в биологии)»

03.02.01 – «Ботаника»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Санкт-Петербург

2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ботаническом институте имени В.Л. Комарова Российской академии наук и учреждении образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы».

Научный консультант доктор биологических наук, профессор
Буданцев Андрей Львович

Официальные оппоненты: **Егошина Татьяна Леонидовна**, доктор биологических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М. Житкова», зав. отделом
Сирин Андрей Артурович, доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт лесоведения Российской академии наук», директор
Нешатаев Василий Юрьевич, доктор биологических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», доцент

Ведущая организация: Институт леса – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Защита состоится 27 марта 2019 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета

Д 002.211.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ботаническом институте им. В.Л. Комарова Российской академии наук по адресу:

197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 2.

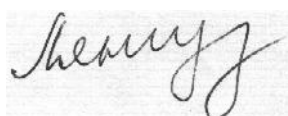
Тел.: (812) 372-54-42; факс: (812) 372-54-43, dissovet.d00221102@binran.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ботанический институт имени В.Л. Комарова Российской академии наук (www.binran.ru).

Автореферат разослан «__» декабря 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,
доктор биологических наук



Лянгузова Ирина Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Необходимость сохранения биологического разнообразия *in situ*, гарантирующая устойчивое развитие окружающей среды, ставит перед наукой новые задачи для обеспечения неотложных приемов, направленных на сохранение и рациональное использование биологических ресурсов, среди которых растительные ресурсы занимают особое положение как основной источник лекарственного и технического сырья. Работа по сохранению и рациональному использованию природных растительных ресурсов рассчитана на долгосрочную перспективу и включает несколько направлений, из которых приоритетными являются разработка эффективных и точных методов оценки лекарственного растительного сырья на основе современных информационных технологий.

Ресурсная оценка востребованных промышленностью лекарственных растений с учетом современных требований к устойчивому природопользованию возможна только при внедрении в практику ресурсоведения дистанционных и не деструктивных методов оценки естественных ресурсов лекарственных растений, что является принципиальным для экологически ориентированного устойчивого использования и охраны окружающей среды, а также, актуальным направлением ресурсоведения в связи с быстрым развитием фармацевтической промышленности, остро нуждающейся в стабильной качественной ресурсной базе. Изучение связи содержания и состава вторичных метаболитов с экологическими и морфологическими параметрами дает возможность прогноза качества лекарственного растительного сырья (Крылова, Кур, 1975). Дистанционные методы оценки запаса лекарственного растительного сырья способствуют созданию рациональной схемы эксплуатации растительного мира. Стратегическое направление современной науки – скорость и точность, в полной мере относится и к ботаническому ресурсоведению, как комплексной науки, содержащей в себе и фундаментальный и прикладной аспекты, которая является основой для рационального природопользования и охраны природы.

Степень разработанности темы. При решении основных задач ботанического ресурсоведения, разработанных её основоположником Ал. А. Федоровым в 60-х годах XX века (Федоров, 1965, 1966), за более чем полувековой период накоплен значительный материал (Крылова, 1984; Куваев, 1989; Растительные ресурсы СССР, 1986, 1987; Будрюнене, Даубарас, 1990; Концепция..., 1996; Черкасов, Миронов, Шутов, 2000; Дикорастущие..., 2001; Буданцев, 1996, 2005). В тоже время, при разработке научных основ эксплуатации естественных зарослей лекарственных растений и новых методов изучения растительного сырья, возникла необходимость: 1) разработки и апробации

прогнозных моделей (экспресс-методов) определения запасов растительного сырья, 2) создания сводки (базы данных) по среднегодовой урожайности ценных в практическом отношении видов в различных условиях произрастания, в первую очередь для промышленно развитых районов, 3) оптимизации классических методов оценки урожайности и запасов растительного сырья, 4) разработки алгоритма ресурсного картографирования на основе современных информационных технологий (данных дистанционного зондирования и географических информационных систем (ГИС), 4) выявления устойчивых тенденций изменчивости показателей количества и качества растительного сырья во времени и пространстве.

Таким образом, тема данной работы соответствует важному направлению исследований в области ботанического ресурсоведения, геоботаники и экологии растений, проводимых в настоящее время в сфере рационального использования и охраны растительных ресурсов, а ее результатом стала новая система не деструктивных и дистанционных методов оценки ресурсов лекарственных растений.

Цель и задачи. Целью работы является определение закономерностей изменчивости качественных и количественных характеристик лекарственных растений на эколого-ценотических градиентах для разработки прогностических моделей оперативной оценки их естественных ресурсов на территории Республики Беларусь.

Задачи:

1. *Провести* оптимизацию методик оценки экологических параметров местообитаний лекарственных растений.
2. *Выявить* устойчивые закономерности согласованной изменчивости морфо-ценотических и ресурсозначимых параметров лекарственных растений.
3. *Изучить* эколого-ценотические особенности и ресурсные параметры модельных видов с выявлением оптимальных местообитаний для заготовки сырья.
4. *Разработать* и *апробировать* эффективную систему оперативной диагностики сырьевых характеристик модельных лекарственных растений.

Научная новизна. Получены новые фундаментальные знания о согласованной изменчивости проективного покрытия и фитомассы лекарственных растений с эколого-ценотическими параметрами биотопов. Разработаны и апробированы не деструктивные и дистанционные методы оценки ресурсов лекарственных растений: оптимизированы наземные методы учета покрытия и урожайности и разработаны алгоритмы дистанционной оценки запасов сырья и ресурсного картографирования лекарственных растений. Разработан новый способ оценки экологического пространства местообитаний

и выявления лимитирующих факторов для фитоценозов, основанный на применении регрессионного анализа и диапазонных экологических шкал. Выявлены статистически значимые закономерности по сезонной и многолетней изменчивости суммарного содержания групп вторичных метаболитов в растительном сырье модельных видов, изучен характер взаимосвязей морфо-ценотических и фитохимических параметров лекарственных растений (ЛР) и их индикаторной значимости на экологических градиентах. Это послужило основой для оптимизации качественной оценки ЛР, а также внесло вклад в развитие теории ботанического ресурсоведения и экологии растений. Основной характер закономерностей изменчивости суммарного содержания вторичных метаболитов ЛР представляет собой бимодальную зависимость с максимумами в субоптимальных условиях на фоне высокой урожайности сырья в оптимальных условиях. На основе данных закономерностей у ряда видов ЛР выявлен ресурсно-фитохимический оптимум заготовки лекарственного сырья и показаны особенности его формирования в зависимости от характера местообитаний и погодных особенностей сезонов.

Теоретическая и практическая значимость. Разработан оригинальный алгоритм определения градаций экологических факторов растительных сообществ на основе экологических диапазонных шкал и регрессионного анализа, а также выявления лимитирующих факторов для лесных фитоценозов. Алгоритм основан на ранжировании диапазонов экологической валентности всех видов растений, входящих в фитоценоз по конкретному фактору с дальнейшим регрессионным анализом по экологическим минимумам и максимумам. Данный алгоритм рекомендован нами для применения в области ресурсоведения, геоботаники, экологии растений. Информационная основа внедрения – алгоритм регрессионного анализа в программе MS Excel 2000, позволяющий ускорить и повысить точность расчетов по диапазонным шкалам Д.Н. Цыганова. В настоящее время он используется для научных исследований в области экологии растений и животных учеными Беларуси, России и Украины (Кутузова, 2012; Жуков, 2015; Иванова, Золотова, 2015; Кручонок, Аношенко, Титок, 2017; Волкова, 2018).

Проведен сравнительный анализ точности различных методов определения проективного покрытия растений с помощью квадрата-сетки с использованием компьютерных технологий. Определены поправочные коэффициенты, позволяющие определять обилие растений более точно. Определено минимальное количество линий (линейных трансект, маршрутных ходов) для определения проективного покрытия с минимальной ошибкой (2–3%). Созданы регрессионные уравнения экспресс-оценки урожайности для модельных видов. Созданы карты запаса лекарственного сырья *Ledum palustre* L. в некоторых районах Беларуси и апробирована оригинальная методика

ресурсной оценки этого вида на нескольких болотных массивах в Гродненской области, основанная на методе отбора проб по градусной сетке. Проведено крупномасштабное картирование ресурсов ряда модельных видов растений (*Comarum palustre* L., *Ledum palustre* L., *Menyanthes trifoliata* L.). Впервые в ботаническом ресурсоведении использована методика кригинга в виде обобщенной линейной регрессии, использующая статистические параметры для нахождения оптимальной оценки минимального среднеквадратического отклонения данных для прогнозной оценки урожайности и ресурсов модельных видов в аналогичных растительных сообществах. Выявлены тенденции и закономерности биотопической, сезонной и разногодичной вариабельности ценологических, морфометрических и фитохимических характеристик *Ledum palustre* L., *Vaccinium vitis-idaea* L., *Comarum palustre* L., *Salix* spp., *Calluna vulgaris* L., *Menyanthes trifoliata* L., а также разработаны экспресс-методы определения урожайности лекарственного растительного сырья. Разработана методика выявления потенциально ресурсозначимых растительных сообществ на основе геоботанических карт.

Положения, выносимые на защиту.

1. Применение регрессионного анализа на основе ранжирования видов по широте экологической амплитуды позволяет оптимизировать фитоиндикационную оценку растительных сообществ и выявление значимых абиотических факторов местообитаний лекарственных растений.
2. Проведение ревизии и модернизации ресурсоведческих и геоботанических методик оценок обилия и площади ценопопуляций повышает их точность и оперативность. Разработанные и апробированные оригинальные экспресс-методы определения урожайности ряда лекарственных растений имеют достаточно высокую устойчивость получаемых данных на региональном уровне.
3. Динамика суммарного содержания фенольных соединений, в том числе флавоноидов, проантоцианидинов, антоцианов и др. имеет бимодальный тренд, в то время как изменчивость сырьевой фитомассы – мономодальный. Для отдельных групп соединений показано несовпадение максимума накопления с высокими значениями сырьевой фитомассы.
4. Ресурсное картографирование на основе современных информационных технологий, классификации растительности, данных наземного и дистанционного зондирования растительных сообществ дает корректную оценку пространственного распределения урожайности и, запасов сырья и позволяет выявить границы перспективных промысловых массивов для его заготовки.

Апробация работы. Материалы исследования докладывались на следующих научных мероприятиях: XIII Съезд РБО, Тольятти, 2013 г., на заседании лаборатории растительных ресурсов БИН РАН, ноябрь 2013, 2014, 2015, 2016, 2018 гг., на Всероссийской геоботанической школе (Санкт-Петербург, 07.10.2015 г.), научном семинаре «Болота и проблемы их использования» на заседании Гидрологической комиссии в штаб-квартире Русского географического общества (Санкт-Петербург, 21.10.2015 г.), на семинаре геоботанических лабораторий Отдела геоботаники БИН РАН (Санкт-Петербург, 28.10.2015 г.), на II Международном научном семинаре «Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны» (Минск, 24–25 сентября 2015 г.), на Галкинских чтениях 2016, 2018 гг. (БИН РАН), на спецсеминаре на кафедре геоботаники и экологии растений СПбГУ (февраль 2016 г., октябрь 2017 г.), на международной конференции «Актуальные проблемы экологии» (Гродно, октябрь 2016 г., октябрь 2017 г.), на I Международной научной конференции молодых учёных, приуроченной Году науки в Республике Беларусь, (Минск, 27–29 сентября 2017 г.), на IV (XII) Международной ботанической конференции молодых учёных в Санкт-Петербурге 22–28 апреля 2018 г., на III Международном научном семинаре «Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны» (Минск–Гродно, 26–28 сентября 2018 г.).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликованы: 3 коллективные монографии, 18 статей в рецензируемых периодических научных изданиях, в том числе 12 из списка, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией РФ для публикации результатов диссертаций, включая 1 статью в издании, реферируемым Web of Science и Scopus, а также 20 публикаций в тезисах и материалах научных мероприятий.

Личный вклад автора. Диссертационная работа является результатом многолетних исследований автора, проводимых на базе кафедры ботаники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы и Института экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси. Автору принадлежит постановка цели и задач исследования, разработка программы и непосредственное участие в ее реализации на всех этапах, включая экспедиционные работы, определение гербарных сборов, обработку геоботанических описаний и ресурсоведческих данных, фитохимический анализ сырья. Автором лично проведено обобщение литературных и полученных экспериментальных данных, сформулированы научные положения работы и выводы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы и 6 приложений. Объем диссертации составляет 268 страниц, включая

59 таблиц, 66 рисунков и список литературы, насчитывающий 380 библиографических источников, из них 50 на английском, немецком и иных иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному консультанту д.б.н., профессору А.Л. Буданцеву за помощь и поддержку на всех этапах работы. Искренне признателен всем сотрудникам лабораторий БИН РАН: растительных ресурсов, географии и картографии растительности, общей геоботаники, экологии растительных сообществ, а также сотрудникам ИЭБ НАН Беларуси, кафедры геоботаники и экологии растений СПбГУ и факультета биологии и экологии ГрГУ им. Я. Купалы.

Благодарность д.фарм.н. Г.Н. Бузуку, д.б.н. К.Г. Ткаченко, д.б.н. В.И. Василевичу, д.б.н. В.С. Ипатову, д.б.н. Н.И. Ставровой, к.б.н. Н.А. Кузьмичевой, к.б.н. Д.Г. Груммо, к.б.н. Н.А. Зеленкевич, к.б.н. О.В. Галаниной, к.б.н. Д.М. Мирину, Е.В. Мойсейчик за продуктивное сотрудничество и постоянную поддержку на протяжении многих лет, за всестороннюю помощь, консультации и рекомендации, сделанные в процессе выполнения диссертации. А также всем коллегам, друзьям, родным и близким, кто поддерживал и помогал мне на всем протяжении выполнения и подготовки работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Проблемы фитоиндикации в экологии и популяционной биологии растений

На основе анализа различных точек зрения исследователей на фитоиндикацию мы определяем индикацию как отражение связи морфологических, структурных, физиологических, фитохимических и других признаков и параметров растений на организменном, популяционном, видовом и ценотическом уровнях с окружающей средой. Фитоиндикация является важным инструментом при оценке комплексных факторов, особенно когда прямое измерение факторов, таких как плодородие, водный режим и др. либо чрезвычайно сложно, трудоемко, либо невозможно. Приемы фитоиндикации характеризуются невысокой стоимостью, возможностью работать в разном территориальном масштабе, относительно простой интерпретацией фактов, а также позволяют оценивать экологические режимы, которые в момент наблюдения могут иметь низкую или нулевую активность. Методы фитоиндикации делят на три типа: аутидикацию (уровень организмов и популяций), сининдикацию (уровень сообществ) и синфитоценоиндикацию (ландшафтную индикацию). В сининдикации различают два уровня: фитоценотический и синтаксономический. В фитоценотической индикации используются индикаторные группы видов, экологические шкалы, эколого-биоморфологические показатели растений (по уровню стено-, мезо- и евритопности видов), и экологическая ординация. Наиболее часто в качестве индикаторных признаков

используют особенности изменчивости обилия, встречаемости, виталитета, фитомассы, физиологических параметров растений на градиенте фактора. При этом индикатор (например, обилие вида) должен обладать достоверностью (быть достоверно связан с фактором) и заметностью (должен быть хорошо определяем и его должно быть достаточное количество для индикации). После оценки баллами отношение видов растений в сообществе к отдельным экологическим факторам, вычисляется их интегральное значения для всего видового состава растительных сообществ и, таким образом, определяется положение фитоценозов в экологическом пространстве на шкалах факторов. Это позволяет сравнивать растительные сообщества между собой, проводить их ординацию по экологическим градиентам. При использовании экологических шкал остаётся неясным вопрос о количественной и качественной индикации лимитирующих факторов для всего фитоценоза. Наиболее популярными в геоботанических исследованиях Восточной Европы являются диапазонные экологические шкалы Л.Г. Раменского (1956), Д.Н. Цыганова (1983) и оптимумные Г. Элленберга (Ellenberg, 1974, 1996) и Э. Ландольта (Landolt, 1977). Отмечена тенденция в специализации фитоиндикации (лихеноиндикация качества воздуха, альгоиндикация эуτροφности водоемов и водотоков и др.), включая и поиск индикаторов, и создание шкал по более дробным факторам (соединения фосфора, калия, кальция, магния и др.), так и выход на глобальный уровень – синтаксономическую индикацию эдафических условий и ландшафтов (Комарова, Прохоренко, 2001).

В настоящее время активно начинают применяться в индикации данные дистанционного зондирования и моделирование для создания региональных экологических шкал, и диагностики экологических режимов. На индикации основана разработка экспресс-методов оценки качества и количества сырья в ботаническом ресурсоведении, в первую очередь на нахождении устойчивых связей показателей фитомассы с экологическими факторами, включая показатели древостоя, а также с размерно-ценотическими показателями самих растений (например, связь характеристик сырья с проективным покрытием). Основными проблемами использования экспресс-методов оценки ресурсной фитомассы являются: необходимость большой выборки при оценке ресурсов, что значительно повышает трудоемкость организации заготовок сырья и высокая изменчивость связи сырья с морфо-ценотическими факторами. Точная индикация компонентного состава по морфологическим параметрам растений не представляется возможной в связи с различными скоростями отклика вторичного метаболизма и морфологии растений на внешние факторы (Metlen, Aschehoug, Callaway, 2009). С точки зрения экспресс-диагностики растительного сырья в момент максимального содержания биологически активных веществ наиболее эффективно использовать фазы

фенологического развития растений, онтогенетические состояния, характеристики ресурсной части и экологические характеристики местопроизрастаний растений. Дистанционная фитоиндикация на больших территориях в технологическом плане основана на создании ГИС, которые позволяют разработать систему информационного обеспечения по биоресурсам в масштабах территории заготовок сырья, включая создание цифровых ресурсоведческих карт (картограмм). По результатам анализа научных литературных источников по использованию информационных технологий в ботаническом ресурсоведении, нами сделаны следующие заключения:

1. актуально создание и внедрение в практику ГИС по растительным ресурсам;
2. ресурсное районирование территории эффективно на основе ландшафтного принципа;
3. для выявления таксационных показателей биотопов – индикаторов наличия и запасов лекарственных и других ресурсных видов – необходимо детальное дешифрирование аэро- и космоснимков;
4. важно дифференцированное использование технических средств съемки территории с учетом масштаба исследований и финансовых возможностей: локальный уровень – беспилотные и пилотируемые летательные аппараты (аэроснимки), региональный и глобальный уровень – космические спутники (космоснимки);
5. необходима разработка и использование специализированных вегетационных индексов, получаемых с космоснимков, для определения запасов и качества сырья лекарственных растений;
6. для наземной экспресс-оценки ресурсного потенциала территории необходима разработка и внедрение портативных приборов для оценки качества и количества сырья в полевых условиях (Созинов, 2015а).

Таким образом, фитоиндикационное направление в ботаническом ресурсоведении является ключевым в оперативной и долгосрочной оценке и прогнозировании количества и качества растительного сырья и в настоящее время, с активным внедрением информационных и космических технологий, является актуальным и востребованным для рационального использования и охраны растительных ресурсов.

Глава 2. Материалы и методы

Исследования проведены в пределах Республики Беларусь в 2004–2017 гг. и охватили все основные районы потенциальной заготовки модельных видов растений (рис. 1). В качестве модельных видов взяты 12 видов официальных лекарственных растений Беларуси: *Ledum palustre* L., *Vaccinium vitis-idaea* L., *Comarum palustre* L., *Salix* spp. (*Salix*

purpurea L., *Salix alba* L., *Salix triandra* L., *Salix cinerea* L., *Salix pentandra* L., *Salix viminalis* L., *Salix acutifolia* Willd.), *Calluna vulgaris* L. и *Menyanthes trifoliata* L. Изучено более 500 ценопопуляций и сделано около 1100 геоботанических описаний.

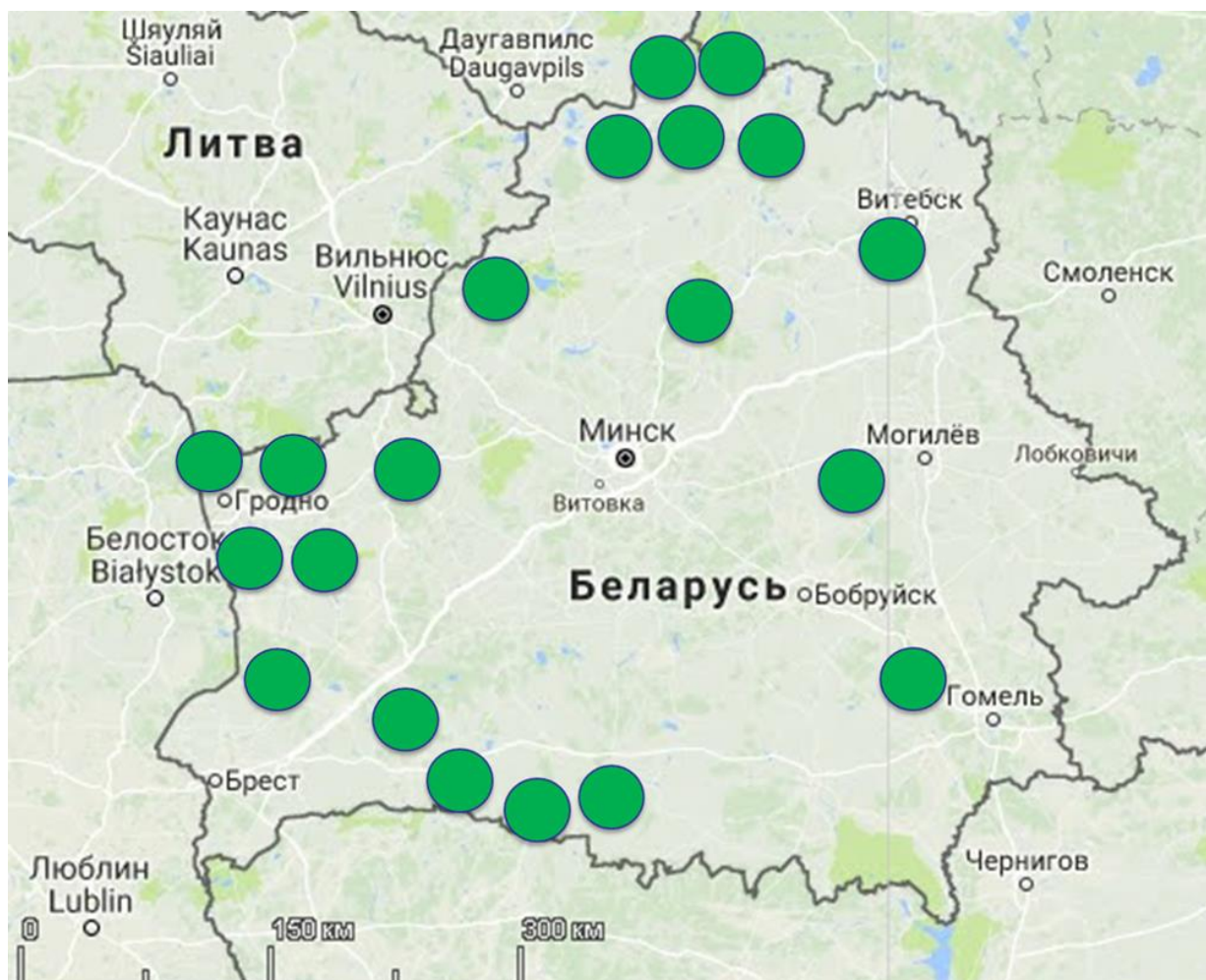


Рис. 1. Районы проведения исследований

Эколого-ценотическое изучение мест произрастаний и ценопопуляций модельных видов проводили методом пробных площадей (100–400 м²) (Полевая геоботаника, 1964). Урожайность и запасы сырья определяли по общепринятым методикам (Буданцев, Харитоновна, 1999) и собственным разработкам. Лекарственное сырье подвергали воздушно-теневого сушке (Правила..., 1985). Фитохимический анализ растительного сырья проводили спектрофотометрически в 3-5 кратной повторности.

Фитоиндикацию экологических режимов биотопов проводили по экологическим шкалам Л.Г. Раменского и др. (1956), Д.Н. Цыганова (1983), Г. Элленберга (Ellenberg, 1974, 1996) и Я.П. Дидука (Didukh, 2011). Фенологические фазы растений определяли по общепринятым методикам (Юркевич, Голод, Ярошевич, 1980).

В большинстве случаев, названия фитоценозов приведено по доминантному принципу (Федорук, 1976; Гельтман, 1982). При картографировании применяли фитоценотический и флористический принципы классификации растительности (Миркин, Розенберг, 1978). Обработку геоботанических описаний осуществляли при помощи компьютерной программы JUICE. Местоположение и координаты пробных площадей определяли с помощью навигатора с точностью до $\pm 3-5$ м и топографической карты.

При картографировании растительности использовались как наземные, так и дистанционные методы (Юрковская, 2007; Груммо, 2014; Груммо, Созинов, 2015).

Названия сосудистых растений даны по сводке С.К. Черепанова (1995). Определение видов сосудистых растений проводили по «Определителю высших растений Беларуси» (1999), мохообразных по «Флоре Беларуси» (2004, 2009), лишайников по «Лишайники Белоруссии» (Горбач, 1973).

Для анализа связей обилия вида с экологическими факторами использовали показатель реактивности и порога чувствительности вида (Ипатов, Кирикова, 1997, 2001).

Статистический анализ результатов исследований осуществляли на основе принципов и методов классической биометрии (Лакин, 1990). Базовую статистику, корреляционный, регрессионный, кластерный, дисперсионный и др. статистические анализы проводили в программах PAST, STATISTICA и Matlab.

Модернизированные методы и методики, а также разработанные в процессе данной научно-исследовательской работы методические приемы отражены в соответствующих главах диссертации.

Глава 3. Оптимизация методов оценки и прогноза экологических факторов и растительных ресурсов

Методика оценки градаций абиотических факторов сообщества. Суть предложенного нами способа оптимизации расчета экологических градаций по шкалам Д.Н. Цыганова (1983)¹ заключается в ранжировании диапазонов толерантности к конкретным экологическим факторам видов растений, формирующих определенный фитоценоз, и вычислении линейной регрессии для верхнего и нижнего диапазонов значений баллов факторов относительно их диапазона. Обе прямые регрессии, проведенные через верхний и нижний диапазоны фактора, пересекаются на оси ординат в одной точке. Эта величина равная свободному члену обоих уравнений регрессии и является характеристикой местообитания по исследуемому фактору (рис. 2).

¹ http://cepl.rssi.ru/bio/flora/new_metod_sc.html

Применение математико-статистического анализа позволяет не только оценить величину экологического фактора для данного местообитания, но и определить его значимость на 0,05 доверительном уровне, верхний (95%) и нижний (95%) доверительные интервалы для коэффициентов регрессии, а также коэффициент детерминации (R^2), характеризующий силу связи. Данный показатель весьма сильно отличается для максимального и минимального диапазонов исследованных факторов, что дало нам основание для дальнейшего поиска оценки экологического положения сообщества.

Методика выявления лимитирующего фактора для сообщества. Для оценки положения растительного сообщества в системе экологических координат и выявления лимитирующих факторов использовали для анализа площади (S_1 и S_2), формируемые линиями регрессии при фитоиндикации (рис. 2).

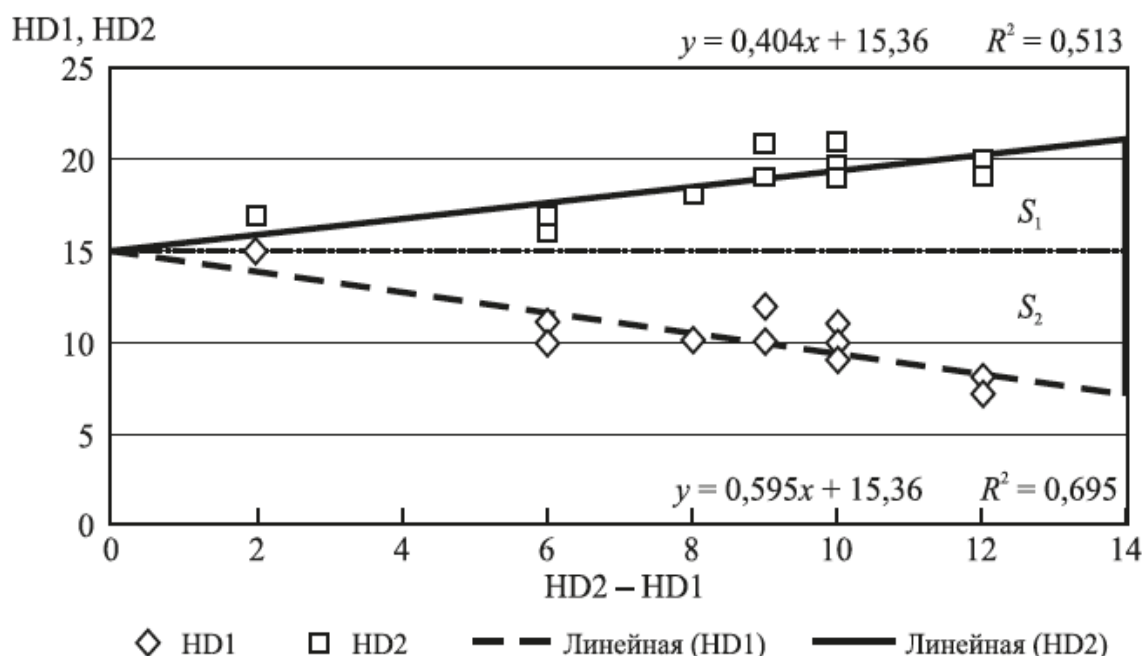


Рис. 2. Оценка градации увлажнения фитоценоза (на примере сероольшанника)

По оси абсцисс: градации длин амплитуд видов; по оси ординат: экологическая шкала (HD – увлажнение); HD1 – минимальные значения амплитуд, HD2 – максимальные значения амплитуд, HD2–HD1 – величина экологической амплитуды, S_1 – треугольник максимума; S_2 – треугольник минимума; квадрат – экологический максимум вида, балл; ромб – экологический минимум вида, балл; $Y = b \cdot X + a$ – уравнение регрессии, где a – значение градации фактора для сообщества, R^2 – коэффициент детерминации, пунктирная линия – линия регрессии по минимальным значениям амплитуд видов, сплошная линия – линия регрессии по максимальным значениям амплитуд видов.

Для дифференцированной экологической оценки фитоценоза с целью выявления лимитирующих факторов для сообщества мы использовали экологический индекс (EI) фитоценоза по конкретному фактору:

$$EI = 100 \cdot (S_2 - ((S_1 + S_2)/2)) / ((S_1 + S_2)/2),$$

где, S_1 и S_2 – площади треугольника максимума S_1 и треугольника минимума S_2 , усл. ед.

При оптимальных условиях фитоценоза (типа сообщества) по конкретному фактору S_1 и S_2 равны и соответственно, экологический индекс (ЕІ) равен 0. Превышение области значения индекса на 50% и более, мы принимали за достаточно значимое ограничивающее влияние данного фактора на видовой состав фитоценоза, а знак индекса показывает качество лимитирующего фактора своим недостатком или избытком. Отрицательные значения индекса означают лимитирующее влияние в области экологического минимума. При положительных значениях ограничения по фактору лежат в области экологического максимума. Индекс ЕІ рассчитывается на основе диапазонных шкал Я.П. Дидука (Didukh, 2011), а для валидации ЕІ мы использовали ординацию по шкалам Н. Ellenberg (1974) на основе 319 геоботанических описаний сосняков центральной Беларуси, которые нами отнесены к 12 типам. Показано, что каждому типу сосняков соответствует оригинальный спектр значений экологических индексов. Вектор изменчивости ЕІ выше он назывался иначе; здесь нужно единообразие точно соответствует градиентам факторов, полученным на основе ординации, т.е. адекватно отражает изменчивость абиотических факторов в эдафо-фитоценологических рядах фитоценозов, включая определение лимитирующих факторов.

Методики учёта проективного покрытия и площади популяций растений. Оптимизирован способ оценки проективного покрытия с помощью квадрат-сетки, основанный на учете всех вариантов заполнения квадратов надземной частью. Предложен алгоритм определения проективного покрытия, учитывающий наиболее точно «проективный вес 1%» квадратов:

$$\text{проективное покрытие, \%} = 0,85a + 0,25b + 1,85c ,$$

где, a – число ячеек сетки, заполненных наполовину и более; b – число ячеек сетки, заполненных менее чем наполовину, c – число ячеек сетки, заполненных полностью.

Коэффициент 1,85 для переменной «с» необходимо использовать при компьютерной оценке обилия на фотоплощадках. При глазомерной съёмке он составляет 1,05.

Для наиболее точной оценки определения проективного покрытия растений различными методами по цифровым изображениям виртуальных и реальных учетных площадок (фотоплощадок) целесообразно использовать метод точек, при котором ошибка составляет до 5–6%. Показано, что различия в оценке проективного покрытия глазомерным (экспертным) и программным (компьютерным) методом варьируют до 10%. Цифровой формат метода уколов (метод фототочек) дает точность оценки проективного покрытия близкую к лучшим глазомерным экспертным оценкам, что в значительной степени расширяет возможности точного определения обилия растений по

фотоплощадкам (фотография учетной площадки с равномерно нанесёнными по сетке 100 точками). В результате компьютерного моделирования по определению площади зарослей лекарственных растений методом маршрутных ходов выявлено оптимальное количество линий (4–7 трансект), позволяющее получить точность учета площади в пределах ± 5 –10%.

С помощью информационных технологий нами показано, что для учета проективного покрытия и площади зарослей (плотных гектар) с квадратичным отклонением ± 5 –10% достаточно 20–25 точек на линейную трансекту при 5–8 кратной повторности. Разработанная методика масштабирования площади уколов (точек) дала возможность выявлять «эффективный размер» учетных площадок для любой пробной площади, что позволяет данный метод использовать на ключевых участках. На примере *L. palustre* нами установлено, что оценка урожайности, полученная методом пробных площадей (учетных площадок) и методом точек отличалась до 30%, что связано с более детальным учетом точек пространственного распределения ресурсного вида в пределах ключевого участка. Аналогичный результат получен при параллельной оценке двумя методами урожайности *V. vitis-idaea* в пределах выделов леса (типа леса). По урожайности различия результатов колебались от 20 до 60% (в среднем 25%), по встречаемости – от 1 до 34%. При этом выявлена прямая корреляция между площадью выдела и разницей (по модулю) рассчитанных запасов сырья по двум методикам: $r = 0,97$ ($p < 0,05$), что подтверждает мнение В. И. Василевича о пределах экстраполяции результатов геоботанических описаний (Василевич, 1969). Это свидетельствует о том, что сравнение результатов по урожайности, полученных разными методиками, часто некорректно, и для определения реальной урожайности и, соответственно, запаса сырья необходим полный охват контура растительности.

В результате выявлен общий характер формирования высокой урожайности *L. palustre* в пределах лесоболотных комплексов: по пологим склонам болотных массивов в сосняках багульниковых и осоково-сфагновых, а *V. vitis-idaea* – в условиях вырубок древостоя при боковом затенении и опушках сосняков бруснично-мшистых.

Экспресс-методы определения ресурсных показателей модельных видов. Получены регрессионные уравнения определения сырьевой фитомассы через морфо-ценотические параметры изученных модельных видов. Линейные уравнения связи урожайности с обилием и размерными признаками показали возрастание достоверности моделей при оценке сырьевой части в ряду: листья ($R^2=0,89$ – $0,95$), надземные побеги ($0,6$ – $0,8$) и корневища ($0,83$). В определении урожайности генеративных частей побегов (лекарственное сырье) у *C. vulgaris* коэффициент детерминации составил 0,5. При

использовании дополнительной переменной (длина сырьевой части) точность уравнения возросла до 0,7.

Сравнительный анализ результативности уравнений линейных и аллометрических функций (Вейбулла), на примере *V. vitis-idaea* на микроплощадках (<1 м²), показал более высокую надежность вторых (коэффициент детерминации больше на 0,01–0,06). Использование линейных уравнений при невысоких значениях обилия (до 10–15%) часто дает отрицательные значения по массе, что ограничивает использование данного типа зависимости в практике. Принципиальных отличий по точности уравнений при глазомерной и программной оценке обилия нет. При возрастании степени генерализации данных снижается различие в результатах между урожайностью, определенной двумя методами. Таким образом, оба типа уравнений вполне применимы для экспресс-оценки фитомассы *V. vitis-idaea* при работе в ресурснозначимых зарослях лекарственных растений, в которых проективное покрытие более 10%. При определении урожайности по проективному покрытию на классических учетных площадках (1 м²), различия по надежности линейных и аллометрических моделей возрастают: $R^2=0,77$ и $0,93$, соответственно. Апробация линейных уравнений и уравнения Вейбулла на ключевых участках (100 точек на 1 км²) *V. vitis-idaea* также показала более высокое качество уравнений Вейбулла для описания зависимости фитомассы и обилия. Отмечено, что качество уравнений возрастает при учёте встречаемости модельного вида растения. Проверка уравнений на точность определения урожайности по проективному покрытию из фактических данных подтвердили ограничение до 10% для линейных уравнений, которые при низких уровнях проективного покрытия дают отрицательную прогнозную фитомассу. Сравнение зависимостей, полученных с пробных площадей и с ключевых участков (рис. 3), показало достаточно высокое сходство результатов по функции Вейбулла: сходные коэффициенты уравнений и одинаковый $R^2=0,93$, что говорит о самоподобии зависимостей и указывает на более универсальные свойства асимптотической функции Вейбулла в оценке связи проективного покрытия и урожайности. Линейные модели имеют меньшую прогностическую значимость ($R^2=0,77–0,85$) и ограничения в использовании с проективным покрытием менее 10%.

Проверка регрессионных уравнений белорусских исследователей (Бузук, 2013; Кузьмичева и др., 2013; Бузук, 2014) по оценке урожайности *V. vitis-idaea* с помощью проективного покрытия на микроплощадках на авторском материале показало их высокую изменчивость, тогда как уравнения, созданные на данных с классических учетных площадок (1 м²) (Сысой, 2016), продемонстрировали достаточно высокое сходство по результативности. Использование уравнений для определения урожайности

V. vitis-idaea, рекомендованных для применения в центральной части Европейской России (Крылова, Капорова, 1992; Егошина, 2005) дало завышенные результаты. Это свидетельствует, во-первых, о возможной интегральной изменчивости параметров, определяющих урожайность *V. vitis-idaea*, а во-вторых, о целесообразности использования экспресс-методов внутри тех регионов, для которых они разработаны.

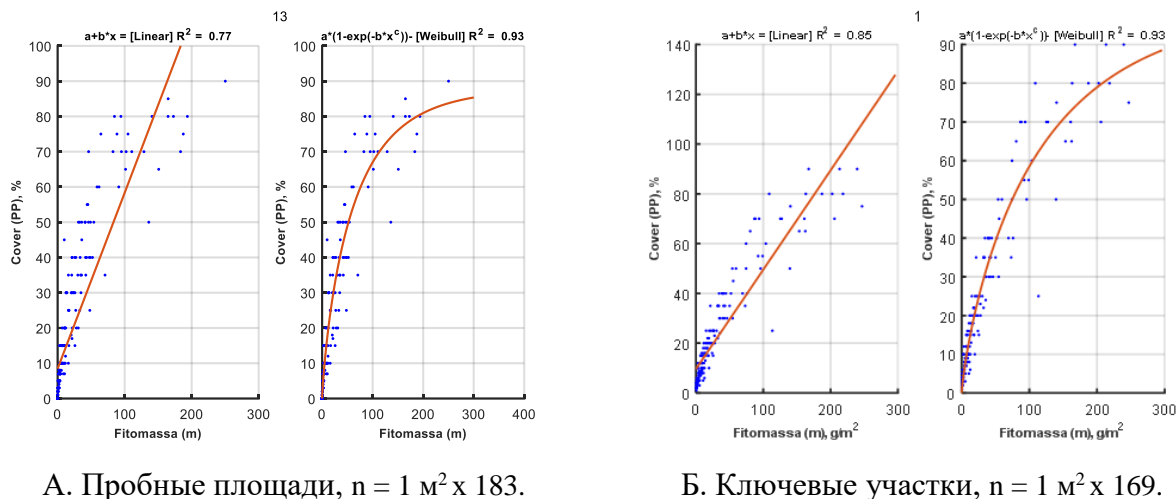


Рис. 3. Характер связи проективного покрытия и урожайности *Vaccinium vitis-idaea* при использовании линейной функции и функции Вейбулла

Cover (PP), % – проективное покрытие/м²; Fitomassa (m) – урожайность (воздушно-сухое сырье, г/м²); R² – коэффициент детерминации.

Регрессионные уравнения для модельных видов рода *Salix* показали тесную связь диаметра побега с массой коры, а также более точное отражение связи фитомассы и морфометрических параметров уравнением Вейбулла по сравнению с линейными функциями. Использование в регрессионном уравнении длины и диаметра побега повышало адекватность модели, поскольку коэффициент детерминации в объединённых уравнениях был всегда выше, чем для уравнений с одной переменной.

Выявлено, что удельная цена 1% проективного покрытия (отношение урожайности к проективному покрытию) облиственных побегов *V. vitis-idaea* оказалась схожа во всех исследованных районах и сезонах и составила $0,03 \pm 0,001$ г/дм²/% (возд.-сух.), что позволяет использовать найденную весовую цену 1% в экспресс-оценке запасов сырья *V. vitis-idaea* на региональном уровне при обязательном учете размерности учетных площадок, в которых определяется проективное покрытие.

При расчете проективного веса побегов *V. vitis-idaea* с использованием проективного покрытия и метода уколов на микроплощадках были получены сходные значения (~1,1 г/дм²) при варьировании веса по первой методике от 0,6 до 2 и по второй от

0,7 до 1,6 г/дм². По нашим данным значение проективного веса побегов *V. vitis-idaea* на вырубках и опушках значительно выше, по сравнению с локусами, расположенными под пологом древостоя. Это свидетельствует о необходимости дифференцированного подхода к оценке запаса сырья с использованием урожайности и проективного веса.

Сложность линейных и асимптотических уравнений ограничивает использование регрессионных уравнений на практике и обосновывает создание контрольных таблиц в зависимости от диапазона обилия и типа биотопа, а также более широкое использование проективного веса. На основе данных по проективному покрытию и фитомассе побегов *V. vitis-idaea* с 351 учетной площадки сформированы 14 классов покрытия *V. vitis-idaea* (шаг 5–10%) с соответствующими данными по урожайности побегов. Изменчивость урожайности снижается при возрастании обилия *V. vitis-idaea* ($r = -0,77$), что говорит о более устойчивых показателях урожайности у высоких классов покрытия. При этом, чем больше выборка, тем выше изменчивость урожайности ($r = 0,93$), что необходимо учитывать при создании контрольных таблиц.

Сравнение оригинальных данных с данными И.Л. Крыловой и В.И. Капоровой (1992) по классам обилия *V. vitis-idaea* выявило, что диапазоны изменчивости (минимум–максимум) урожайности ни по одному классу не пересеклись и относительная разница оригинальных значений урожайности и значений их контрольной таблицы составила от 50% до 80%, что свидетельствует о необходимости создания для производства, в первую очередь для лесного хозяйства, региональных таблиц. На основании полученных данных по урожайности коры побегов пяти видов рода *Salix* нами также составлены контрольные таблицы по урожайности коры модельных побегов с учетом длины побега (4 класса побегов по длине, $n = 20–194$, $C_{V_{\text{cortex}}} = 48–78\%$). Их использование поможет оперативно оценить урожайность сырья этих видов с учетом их нахождения в рельефе (плакор, долина, пойма).

Глава 4. Согласованная изменчивость морфометрических, ресурсно-ценотических и фитохимических характеристик модельных видов растений на экологических градиентах

4.1. Биотопическая изменчивость морфометрических и фитохимических характеристик *Comarum palustre*, *Vaccinium vitis-idaea* и *Calluna vulgaris*.

4.1.1. *Comarum palustre*. Ресурсно-ценотические параметры *C. palustre* варьируют в пойменных биотопах (ключевой участок на примере болота Споровское) в зависимости от ассоциации: проективное покрытие 5–58%, урожайность 19–209 г/м² воздушно-сухого сырья. Максимальная встречаемость (более 90%) и урожайность сырья *C. palustre*

формируется в ассоциациях *Peucedano palustris*–*Caricetum lasiocarpae* и *Equiseto fluviatilis*–*Caricetum rostratae*. В тоже время максимальные запасы *C. palustre* формируются в растительных ассоциациях с доминированием *Carex elata*, вследствие значительной их площади в поймах относительно остальных сообществ, а также высокой встречаемости (80–90%) и относительно высокой урожайности (80–115 г/м²). Для формирования максимальной урожайности корневищ и укоренившихся стеблей *C. palustre* в пойменных биотопах необходим уровень воды (июль–август) +1,6–+7 см (в среднем +2 см) от 0,5 до 2 недель поемности.

С 2000-х годов на низинных болотах Беларуси проводятся масштабные работы по частичному изъятию надземной фитомассы болотных и луговых фитоценозов. В связи с этим, в доминирующей ассоциации *Caricetum elatae* (25% от всей площади ключевого участка) проведена оценка морфо-ценотических параметров *C. palustre* после зимнего и летнего скашивания его надземной части (имитация заготовки сырья) и вытапывания (таблица 1). Выявлено невысокое, но достоверное ($p < 0,05$) влияние режимов эксплуатации на массу одного побега ($\eta^2 = 12\%$), проективное покрытие ($\eta^2 = 13\%$) и плотность побегов ($\eta^2 = 30\%$).

Максимальная дифференциация *C. palustre* между вариантами эксплуатации биотопов отмечена по плотности побегов. По урожайности и проективному покрытию достоверное различие отмечено между контролем и эксплуатируемыми фитоценозами. По массе побега существенная разница только в биотопах в условиях летнего кошения (по наименьшей существенной разнице, $p < 0,05$). По длине побегов достоверных различий у исследованных вариантов биотопов не обнаружено ($p > 0,05$). Летнее кошение в текущем сезоне значимо уменьшало массу одного побега при увеличении их плотности и урожайности. Вытапывание снизило величины плотности побегов, урожайности и облилия при относительно высоких показателях длины и массы побегов.

По нашим данным, изъятие фитомассы зимой несколько увеличило морфо-ценотические показатели, что в итоге привело к формированию максимальной урожайности *C. palustre* в следующем вегетационном сезоне. Изменчивость по содержанию проантоцианидинов в побегах варьировала от 2,7% до 3,8% (таблица 2) в зависимости от степени нарушений биотопов, что соответствует высокому качеству сырья (Государственная..., 2008). В биотопах со сформированной тропиной сетью отмечено достоверное уменьшение содержания проантоцианидинов. Таким образом, в перспективе зимняя заготовка энергоресурсной фитомассы и осенняя заготовка лекарственного растительного сырья является сбалансированным вариантом устойчивой эксплуатации пойменных осоковых биотопов.

Таблица 1. Ресурсные параметры *Comarum palustre* при различных режимах эксплуатации в *Caricetum elatae*

Режим эксплуатации биотопов	Длина побега, см	Масса побега, г	Плотность побегов, шт/м ²	Проективное покрытие, %	Урожайность, г/м ² возд.-сух.	Проантоцианидины, %	
Контроль	53,7±2,3	4,6±0,3	2,1±2,6	25,1±3,5	100,2±12,1	3,6±0,08	
Кошение	зимнее	55,7±5,7	4,7±0,9	32,5±6,9	48,4±7,8	154,4±12,9	3,8±0,15
	летнее	47,5±3,0	2,9±0,3	48,7±5,7	26,3±2,7	140,3±16,3	3,7±0,05
Вытаптывание	58,3±5,4	5,5±0,6	9,9±3,6	17,7±5,4	47,0±7,2	2,7±0,03	

4.1.2. *Vaccinium vitis-idaea*. Урожайность побегов и обилие *V. vitis-idaea* в изученных фитоценозах варьируют от 0,5 г/м², 1,5% до 86 г/м², 51% соответственно. Нами отмечена достоверная связь урожайности *V. vitis-idaea* с относительной освещенностью и трофностью, а также проективного покрытия с относительной освещенностью, увлажнением и трофностью.

Наиболее значимые связи морфометрических параметров листьев (площадь, периметр, длина, ширина и листовой индекс) выявлены с условиями освещенности. Максимальные значения морфометрических параметров листьев выявлены в сосняках бруснично-чернично-мшистом и можжевельново-чернично-мшистом. Минимальные значения данных параметров отмечены на вырубке в сосняке вересково-мшистом, где листья *V. vitis-idaea* были мелкими широкоэллиптическими. Это свидетельствует о высокой пластичности листьев к особенностям экологических режимов биотопов и, соответственно, определяет изменчивость урожайности сырья (Крылова, Созинов, 2012).

На градиенте с возрастающей неустойчивостью увлажнения при увеличении инсоляции отмечено формирование мелких широкоэллиптических листьев. Сила достоверного ($p = 0,036$) отрицательного ($r = -0,88$) влияния инсоляции (относительная освещенность) на площадь листовой пластинки составляет 97%.

Максимальная урожайность *V. vitis-idaea* с мелкими узко- и широкоэллиптическими листьями на вырубках и опушках достигается высокими значениями плотности побегов и плотности листьев на побег, при этом масса одного листа на вырубке примерно в два раза меньше, чем на опушке, а количество годовых приростов на побег выше. В итоге это приводит к сходным значениям урожайности (вырубка: 86±9,2 г/м²; опушка: 75±7,4 г/м²).

Для ценопопуляций с невысокой урожайностью характерна низкая плотность побегов. При этом годовой прирост побегов в ценопопуляциях с низкой урожайностью несколько выше, но количество приростов на побег ниже, чем в наиболее урожайных. Выявлена зависимость урожайности сырья от плотности побегов ($r = 0,84$; $R^2 = 0,7$), плотности листьев на побег ($r = 0,74$, $R^2 = 0,6$). Она подтверждает данные Т.В. Пааль и

Я.Л. Пааль (1980) со сходным коэффициентом корреляции. Невысокая масса листа в условиях открытых биотопов компенсируется относительно высокой плотностью побегов, количеством приростов на побег и плотностью листьев на побег. Нами отмечены взаимнообратные связи плотности листьев на побег ($r = 0,61$) и длины прироста побега ($r = -0,59$) со степенью освещенности.

Наименьшая реактивность и относительно высокий порог чувствительности по проективному покрытию и урожайности *V. vitis-idaea* нами выявлены при относительной освещенности 26–70%, что, согласно В.С. Ипатову и Л.А. Кириковой (1997), свидетельствует об условиях близких к синэкологическому оптимуму. В субоптимальных по освещенности условиях (относительная освещенность: 16–26% и 70–93%) степень реактивности проективного покрытия *V. vitis-idaea* сходна, но порог чувствительности в затененных биотопах является более низким. По урожайности при относительной освещенности (16–26%) реактивность в более сомкнутых сообществах в 2,4 раза меньше, чем в условиях повышенной инсоляции (70–93%) при сходном пороге чувствительности (2–2,5%). Возможно, это обусловлено тем, что высокие значения инсоляции способствует усилению вегетативного размножения *V. vitis-idaea* (Пааль, 1983), что формирует более продуктивные популяции. Максимумы накопления разных групп вторичных метаболитов биотопически не совпадают: по суммарному содержанию фенольных соединений – это открытые биотопы (опушки, поляны, вырубки), по флавоноидам – экотон суходол/болото, по проантоцианидинам – широкий спектр ассоциаций среднеполнотных сосняков мшистых. При анализе результатов регрессионного анализа установлена достоверная положительная зависимость суммарного содержания флавоноидов от увеличения интенсивности инсоляции. По нашим данным оптимально заготовку сырья *V. vitis-idaea* проводить на вырубках, полянах и опушках, поскольку в этих условиях наблюдается бóльшая сбалансированность показателей качества сырья.

4.1.3. *Calluna vulgaris*. Данный постпирогенный вид мы изучали на пространственно-временных рядах сухих сосновых лесов, метод построения которых, заключался в подборе сходных по типу местообитания территорий с разной давностью нарушения (после пожара). Во всех изученных биотопах встречаемость *C. vulgaris* составляла 100%. Сквозистость и стадия демутации находятся в отрицательной зависимости: $r = -0,84$. Максимальные величины морфо-ценотических параметров (рис. 4) отмечены в условиях полного освещения (9–12 лет после пожара: до формирования сомкнутого подроста и подлеска), тогда как минимальное обилие (34%) и урожайность (30,5 г/м²) отмечены в сосняке бруснично-вересково-мшистом с давностью пожара ~50 лет, сквозистостью полога 50% и абсолютной полнотой древостоя 27,5 м²/га. Это согласуется с мнением К.Ф.

Саевича (1990), что надземная масса *C. vulgaris* уменьшается по мере смыкания крон и увеличения плотности полога древостоя. Критерий наименьшей существенной разницы по урожайности и обилию на градиенте сквозистости достоверно выявил две совокупности ценопопуляций: первая группа – в условиях полного освещения (первые стадии демутиации до формирования древесного яруса) и вторая – под пологом леса (редколесье и сомкнутые лесные фитоценозы). Именно световой режим является решающим фактором в формировании обилия *C. vulgaris* (рис. 4), в чём проявляется сходство с *V. vitis-idaea*. Отмечена обратная зависимость урожайности *C. vulgaris* и стадии демутиации фитоценозов. Для ценологических и морфологических характеристик ценопопуляций отмечено доминирование нелинейных зависимостей ($t_k > 3$) от экологических факторов с максимальными значениями морфо-ценологических параметров в условиях биотопа после 10-летнего нарушения (рис. 4).

Выявлено дифференцированное влияние изученных экологических факторов и степени демутиации на морфо-ценологические и фитохимические характеристики популяций. Степень восстановления фитоценозов с динамическим комплексом эколого-ценологических факторов является определяющим для урожайности и обилия *C. vulgaris*: $\eta^2 = 48\text{--}67\%$, $\eta^2 = 49\text{--}57\%$, соответственно. Для урожайности и обилия сила влияния фактора (η^2) и вектор (r) к экологическим факторам сходны при различиях на 1–10% η^2 в меньшую сторону у проективного покрытия. Выявлена линейная зависимость урожайности от уровня сквозистости крон древостоя ($\eta^2 = 45\%$, $r = 0,65$, $p < 0,05$, $t_k = 1,25$); сходный вектор, но менее выраженный, зафиксирован также и по проективному покрытию ($r = 0,36$).

Нами отмечено повышенное суммарное содержание флавоноидов в сырье *C. vulgaris* в хорошо освещенных зарослях – верещатниках или на начальных стадиях восстановления древостоя, с максимумом в молодой популяции, сформировавшейся через 3–5 лет после пожара. Наиболее высокий уровень накопления суммарного содержания фенольных соединений и антоцианов выявлен в сосновом редколесье со сквозистостью 90%. Отмечена положительная связь суммарного содержания флавоноидов с уровнем трофности ($r = 0,40$, $\eta^2 = 70\%$, $p < 0,05$), содержанием азота в почве ($r = 0,56$, $\eta^2 = 64\%$, $p < 0,05$), переменной увлажненности ($r = 0,50$, $\eta^2 = 82\%$, $p < 0,05$) и отрицательную – со стадией восстановления фитоценозов после нарушения ($r = -0,56$, $\eta^2 = 83,5\%$, $p < 0,05$). На содержание антоцианов в соцветиях *C. vulgaris* значимое влияние оказывает увлажнение почв ($r = -0,40$, $\eta^2 = 41\%$, $p < 0,05$) и уровень освещенности ($r = -0,34$, $\eta^2 = 20\%$, $p < 0,05$).

Ресурсно-фитохимический оптимум заготовки растительного сырья *C. vulgaris* локализован в верещатниках (до 6–10 лет после нарушения).

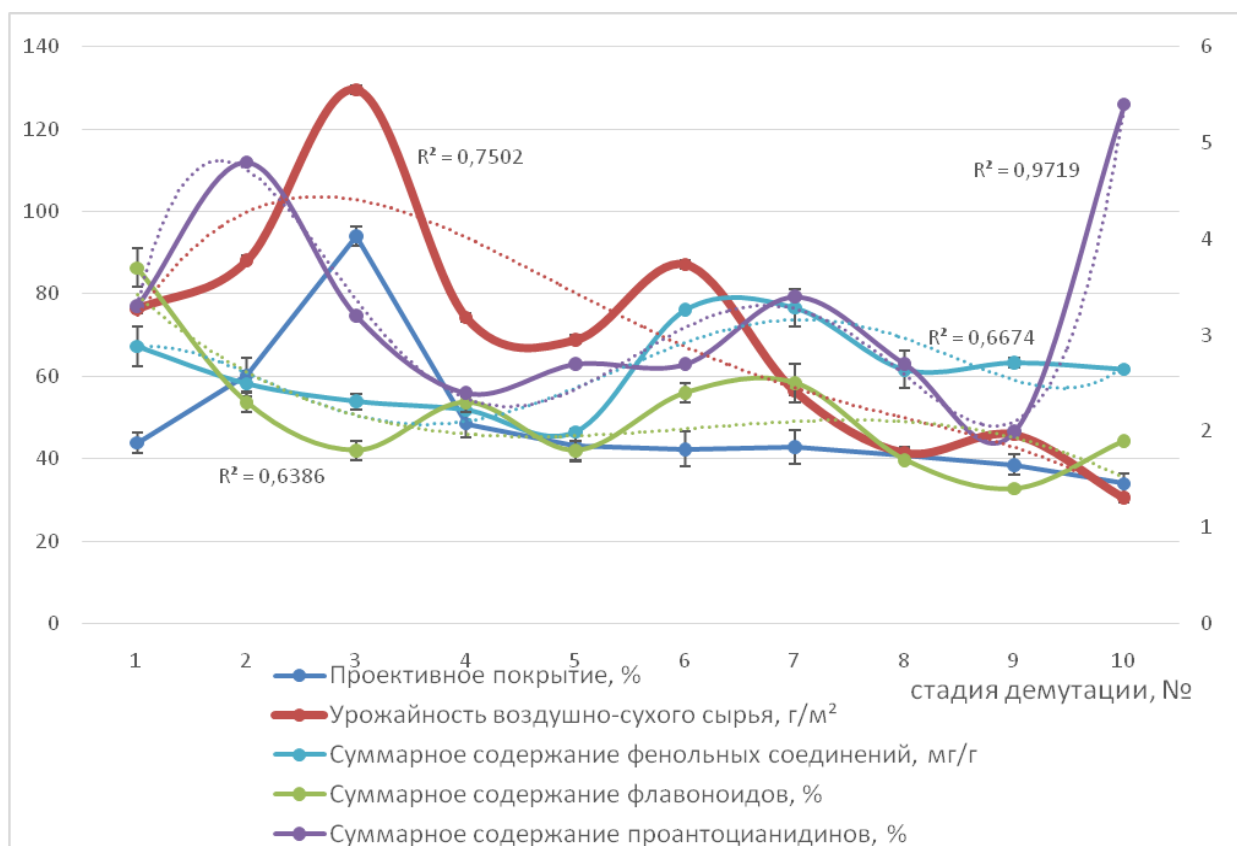


Рис. 4. Изменчивость ценотических и фитохимических параметров ценопопуляций *Calluna vulgaris* на градиенте восстановления фитоценозов

1 балл – 3–5 лет после пожара, 2 – 6–8, 3 – 9–12, 4 – 13–15, 5 – 16–20, 6 – 21–24, 7 – 25–30, 8 – 32–36, 9 – 37–44, 10 баллов – 45–50 лет; левая ось у – урожайность, г/м², обилие, %/м², суммарное содержание фенольных соединений, мг/г, правая ось у – суммарное содержание флавоноидов, проантоцианидинов, %.

4.2. Внутрибиотопическая разногодичная изменчивость ценопопуляции *Vaccinium vitis-idaea*

Исследования проводились в перестойном сосняке бруснично-чернично-мшистом на склоне коренного берега озера на экологическом профиле (в апреле-мае 2007 и 2012 гг.). Отмечено, что проективное покрытие *V. vitis-idaea* положительно коррелирует с уровнем освещённости ($r_{sp} = 0,6$, $p = 0,04$), что подтверждает данные о высокой чувствительности этого вида к световому режиму (Баландина, Вахрамеева, 1978; Касьянов, Турышев, Агафонцева, 2013; Созинов, 2014). В средней части склона проективное покрытие и урожайность *V. vitis-idaea* имели наибольшие значения (рис. 5).

Выявлен разногодичный тренд изменчивости содержания флавоноидов. При этом амплитуда колебаний минимального и максимального значений в 2012 г. была почти в 2 раза выше, чем в 2007 г. (коэффициенты вариальности 22,7% и 13,3% соответственно, а достоверность аппроксимации (R^2) полиномиальной (5 степени) линии тренда в 2012 г. по сравнению с 2007 г. уменьшилась в почти в 2 раза.

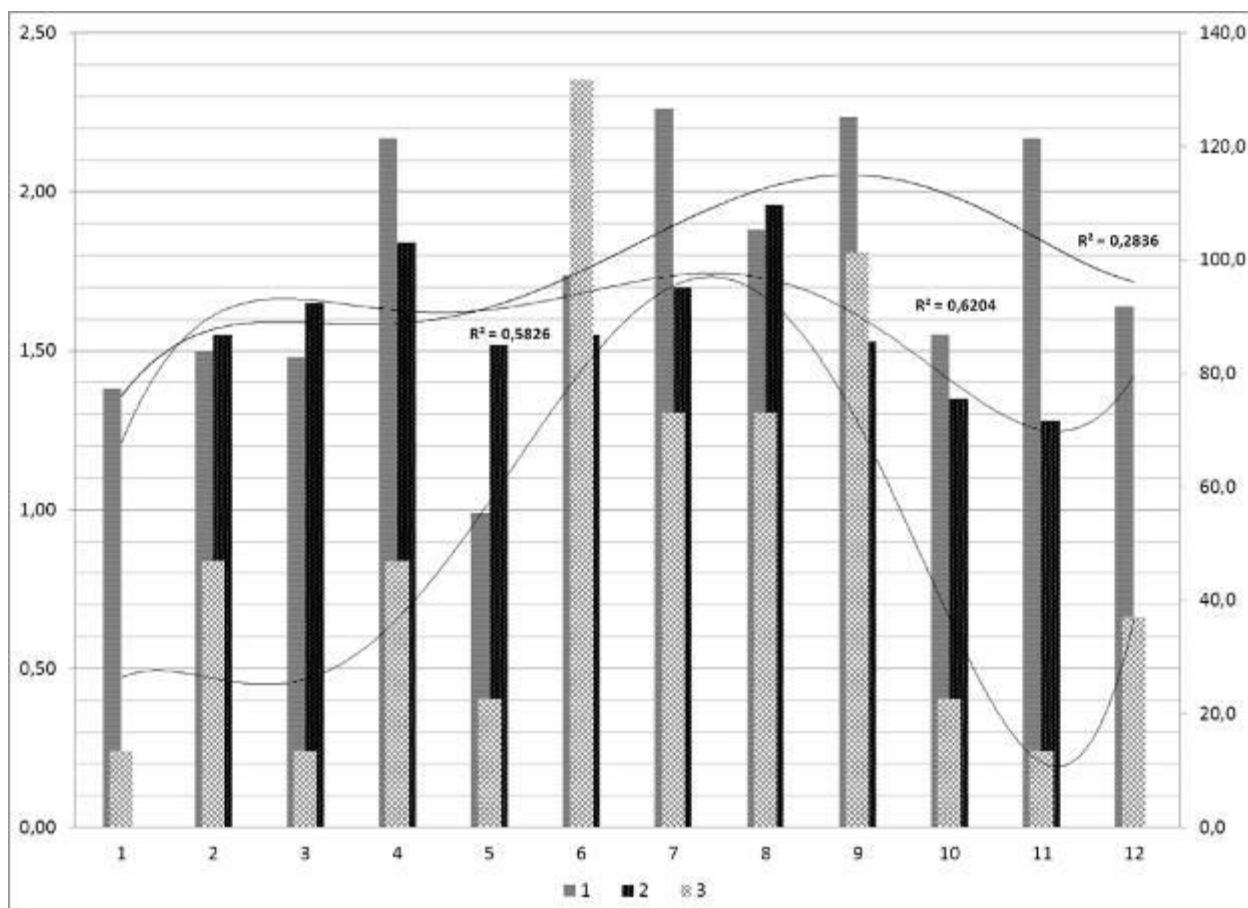


Рис. 5. Изменчивость суммарного содержания флавоноидов и урожайности

Vaccinium vitis-idaea на орографическом градиенте

Ось ординат левая: содержание флавоноидов, %; ось ординат правая: урожайность сырья, г/м²; ось ординат – орографический градиент: №№ учетной площадки (№1 – подножье склона, №12 – вершина склона; перепад высот 20 м); линия – полиномиальная линия тренда пятой степени; R² – коэффициент детерминации; 1 – суммарное содержание флавоноидов (2012 г.), %; 2 – суммарное содержание флавоноидов (2007 г.), %; 3 – урожайность побегов, г/м².

Это, на наш взгляд, связано с более холодным и влажным зимне–весенним сезоном 2012 г. по сравнению с 2007 г. и с аномально высоким количеством осадков (в 1,5 раза больше, чем в 2007 году), в том числе осадками в апреле (84 мм), выпавшими за 18 дней. Вероятно, в таких экстремальных условиях дифференцирующую роль в накоплении флавоноидов начинают играть формы микрорельефа берегового склона, в тоже время общий рисунок тренда изменчивости их накопления сохраняется. Содержание арбутина сходно во всех участках профиля, тогда как содержание проантоцианидинов от основания до вершины склона имеет волнообразный характер с положительной тенденцией к вершине склона ($r = 0,66$, $p = 0,004$). Сравнительный анализ суммарного содержания флавоноидов в листьях *V. vitis-idaea* за два сезона не показал различий на 5% уровне.

При анализе взаимодействия *V. vitis-idaea* с компонентами живого напочвенного покрова изученного фитоценоза, выполненного по методике В.С. Ипатова и др. (2010), выявлено очень сильное влияние *V. myrtillus* (46% варьирования обилия *V. vitis-idaea* обусловлено чистым влиянием *V. myrtillus*). Существенную роль играют зелёные мхи (12% варьирования обилия *V. vitis-idaea* обусловлено их чистым влиянием). Совокупное влияние всех видов растений живого напочвенного покрова со встречаемостью от 30% на обилие *V. vitis-idaea* составляет 68% факториального варьирования, при определяющей роли *V. myrtillus*, т.к. доля варьирования данного вида в сумме факториальных варьирований всех видов относительно *V. vitis-idaea* составляет 0,6.

При обилии *V. myrtillus* до 10% реактивность *V. vitis-idaea* составляет 0,77% с порогом 2,6%, а при обилии *V. myrtillus* от 10 до 40% реактивность *V. vitis-idaea* снижается с возрастанием порога чувствительности (рис. 6).

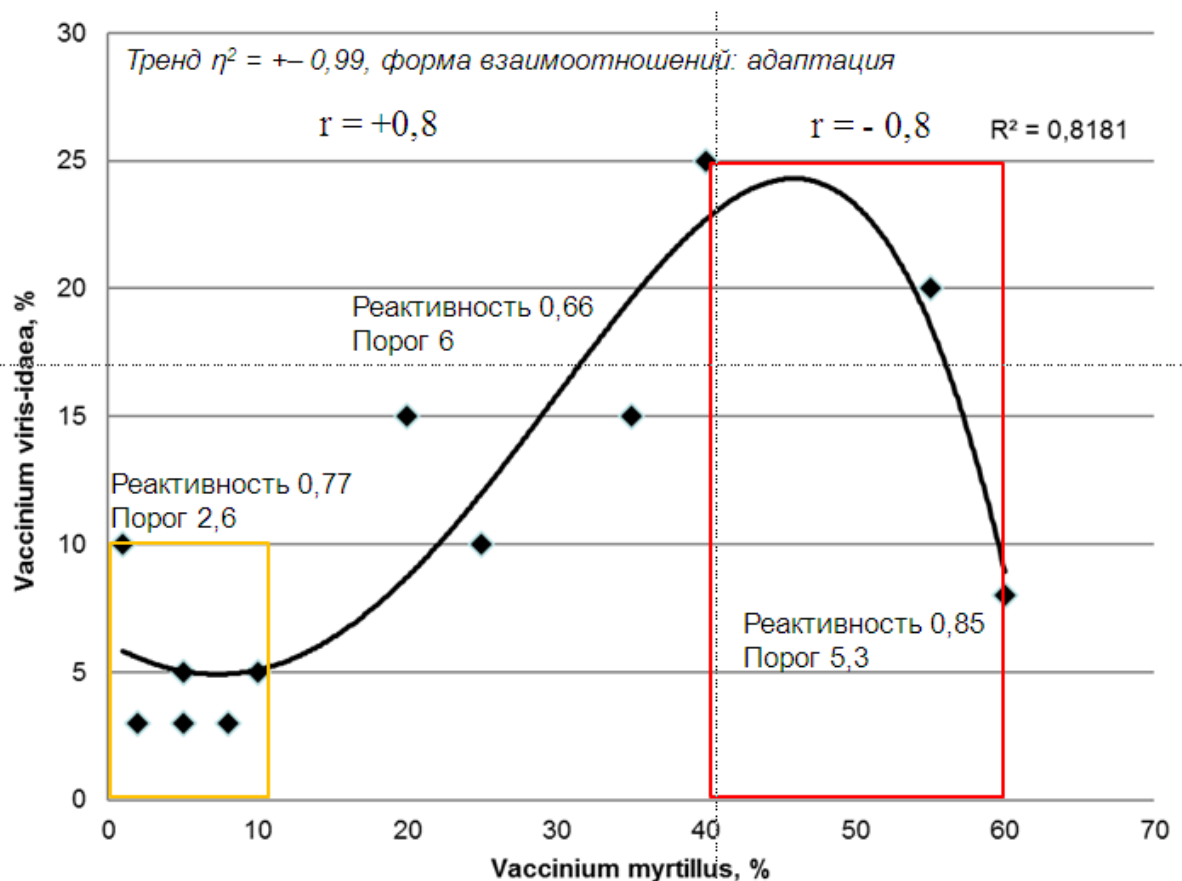


Рис. 6. Характер взаимоотношений *Vaccinium myrtillus* и *Vaccinium vitis-idaea* (по проективному покрытию, %)

При проективном покрытии *V. myrtillus* от 40 до 60% чувствительность *V. vitis-idaea* повышается до 0,85% на фоне снижения порога до 5,3%. Во многом это связано с тенденциями согласованной изменчивости проективных покрытий *V. vitis-idaea* и *V. myrtillus*. На уровне обилия *V. myrtillus* 40% меняется знак коэффициента корреляции

между двумя видами: до 40% *V. myrtillus* корреляция с покрытием *V. vitis-idaea* положительная, после 40% – отрицательная (рис. 6).

Классификация отношений *V. vitis-idaea* с растениями живого напочвенного покрова: адаптивные взаимоотношения – связь *V. vitis-idaea* со мхами, видами семейства *Rufolesae* и с доминирующим видом – *V. myrtillus*. С пациентными и эксплерентными видами взаимоотношения определяются главным образом орографическим фактором (Созинов, Кузьмичева, 2016а).

4.3. Сезонная и многолетняя фитохимическая изменчивость ценопопуляций *Vaccinium vitis-idaea*

Анализ данных по содержанию биологически активных веществ в листьях *V. vitis-idaea*, на примере 12 ценопопуляций, показал, что суммарное содержание флавоноидов достоверно отличается между ценопопуляциями в июле и в августе. Различия по содержанию флавоноидов в одних и тех биотопах между июлем и августом возрастают по мере усиления освещенности, но при максимальном освещении (относительная освещенность более 90%) они снижаются. По фенольным соединениям (в целом) различия между биотопами выражены в меньшей степени, но в целом тенденции схожи, как и у флавоноидов. Аналогичная тенденция прослеживается и с содержанием проантоцианидинов при менее выраженном тренде по градиенту освещенности. Содержание антоцианов меньше в листьях *V. vitis-idaea* в августе, чем в июле, при четко выраженном бимодальном распределении по градиенту освещенности. По всем изученным группам соединений отмечена волнообразная зависимость накопления. При этом по большинству из них максимум накопления приходится на июль в биотопах при освещенности ~90%. Аналогичное сравнение, проведенное в июле и августе 2011 г. показало также в целом достоверные отличия ценопопуляций по изученным соединениям. Это свидетельствует о необходимости вводить в практику заготовки сырья не только сроки сборов, но учитывать погодные особенности и типы биотопов.

Вследствие разного возраста листьев *V. vitis-idaea*, мы предположили, что изменчивость их химического состава может иметь специфические черты. Мы рассмотрели динамику накопления суммарного содержания биологически активных веществ *V. vitis-idaea* за один вегетационный сезон (2011 г.) по двум генерациям листьев: 2010 и 2011 года. Отмечено 2 максимума – июль (совпадает с фенологической фазой созревания плодов *V. vitis-idaea*) и осенние месяцы (подготовка *V. vitis-idaea* с зимующими листьями к периоду зимнего покоя). Отмечена достоверная положительная корреляция между суммами осадков и содержанием фенольных соединений у обеих генераций листьев ($r = 0,72-0,82$). Содержание антоцианов в листьях 2010 г. имело

корреляционную связь с содержанием суммы осадков ($r = 0,85$), при отсутствии достоверной корреляции листьев текущего 2011 года. С температурными режимами ни по одному типу соединений достоверных связей не обнаружено, что подтверждает литературные данные о том, что на накопление флавоноидов, в первую очередь, влияет водный режим (Машурчак, 2010). Сравнение динамики накопления антоцианов показало максимум накопления в двух генерациях листьев в начале июля при максимуме осадков, и асинхронность в начале и в конце вегетационного сезона. По проантоцианидинам – асинхронное изменение их содержания в листьях 2010 и 2011 гг. до конца лета и синхронный осенний тренд до фазы зимнего покоя. К концу вегетации в двух типах листьев изученные соединения имеют сходное содержание. Соответственно, оптимальные заготовки листьев *V. vitis-idaea* рациональнее проводить в конце лета–осенью.

При сравнении многолетних флуктуаций содержания биологически активных веществ в листьях *V. vitis-idaea* в 2010 и в 2011 гг. (июль–август) установлено, что в 2010 г. содержание суммы фенольных соединений и флавоноидов значительно превышает таковое в листьях 2011 г., при сходных пропорциях антоцианов и проантоцианидинов (таблица 2).

Таблица 2. Содержание биологически активных веществ в листьях *Vaccinium vitis-idaea* (средние величины по 12 ценопопуляциям)

Год	Месяц	Суммарное содержание			
		фенольных соединений, мг/г	флавоноидов, %	антоцианов, %	проантоцианидинов, %
2010	июль	46,19±2,19	2,57±0,16	0,038±0,004	7,95±0,44
	август	44,78±1,41	2,05±0,07	0,070±0,004	7,93±0,46
2011	июль	20,30±0,46	1,93±0,06	0,079±0,008	5,75±0,24
	август	14,19±0,04	1,11±0,05	0,040±0,004	8,98±0,46

За июль–август 2010–2011 гг. отмечены значительные различия по содержанию исследуемых групп биологически активных веществ: снижение суммы фенольных соединений и суммы флавоноидов на 60–70% и 25–46% соответственно; содержание антоцианов флуктуирует в пределах 42–57%, проантоцианидинов – 11–27%. Повышенное накопление суммы фенольных соединений, суммы флавоноидов и проантоцианидинов в листьях в 2010 г., на наш взгляд, связано с сухим и жарким июлем 2010 г. Практически по всем фитохимическим показателям отмечены достоверные различия между 2010 и 2011 гг. (июль и август).

Таким образом, ввиду установленной изменчивости накопления некоторых групп вторичных метаболитов, при организации заготовок сырья *V. vitis-idaea* целесообразно проводить своевременную химическую таксацию эксплуатируемых массивов.

4.4. Сезонная и многолетняя изменчивость фитохимического состава коры *Salix viminalis*

Исследования проводились в окр. г. Витебска в 2004–2005, 2007 и 2009 гг. Многолетняя изменчивость содержания флавоноидов и фенологликозидов в коре *Salix viminalis* находилась на довольно высоком уровне: коэффициент вариации колебался от 20 до 70%, тогда как содержание проантоцианидинов было более стабильно и варьировало за сезон от 13 до 20%. В контрастные по метеорологическим условиям года сила связи (η^2) фенофазы и содержания флавоноидов возрастало примерно в 1,5–2 раза (таблица 3).

За годы наблюдений нами установлено, что в период созревания плодов и роста побегов и от начала листопада до распускания почек, включая и зимний покой наблюдается рост суммарного содержания флавоноидов, тогда как в весенний и осенний периоды, содержание флавоноидов в коре снижается (рис. 7).

Содержание суммы флавоноидов между годами достоверно различалось ($p < 0,05$), при максимальных значениях в 2007 г., для которого были характерны теплая зима и весна с аномально тёплым мартом. Вероятно, снижение температурных различий между сезонами года ведет к общему повышению суммарного содержания флавоноидов в коре *Salix viminalis* на фоне уменьшения различий по содержанию флавоноидов между фенофазами (в 2007 г.), тогда как наибольшее различие по содержанию флавоноидов между фенофазами сезона выявлено в 2009 г. со «среднестатистическим» летом (отклонение от нормы $-0,3^\circ\text{C}$ и отношением к норме осадков 108%) и теплой влажной осенью (отклонение от нормы $+1,7^\circ\text{C}$ и отношением к норме осадков 167%).

Таблица 3. Характеристика многолетней изменчивости содержания биологически активных веществ в коре *Salix viminalis*

Биологически активные вещества	2004–2005 гг.			2007 г.			2009 г.		
	η^2 , %	НСР, %	C_v , %	η , %	НСР, %	C_v , %	η , %	НСР, %	C_v , %
Флавоноиды	58,4	40	20,1	40,2	17	19,2	86	70	39,5
Проантоцианидины	64,6	55	13,7	43,1	25	20,6	70	53	17,2
Фенологликозиды	81,6	31	40,2	–	–	–	71	58	36,6

Примечание. η^2 , % – сила влияния фактора (квадрат корреляционного отношения); НСР, % – доля пар сравнения выборки методом наименьшей существенной разницы, имеющих достоверные различия при $p < 0,05$; C_v , % – коэффициент вариации; прочерк – отсутствие данных.

По суммарному содержанию фенологликозидов и флавоноидов степень различия (по наименьшей существенной разнице) между фенофазами в 2009 г. относительно 2004–2005 гг. увеличилась примерно в 2 раза.

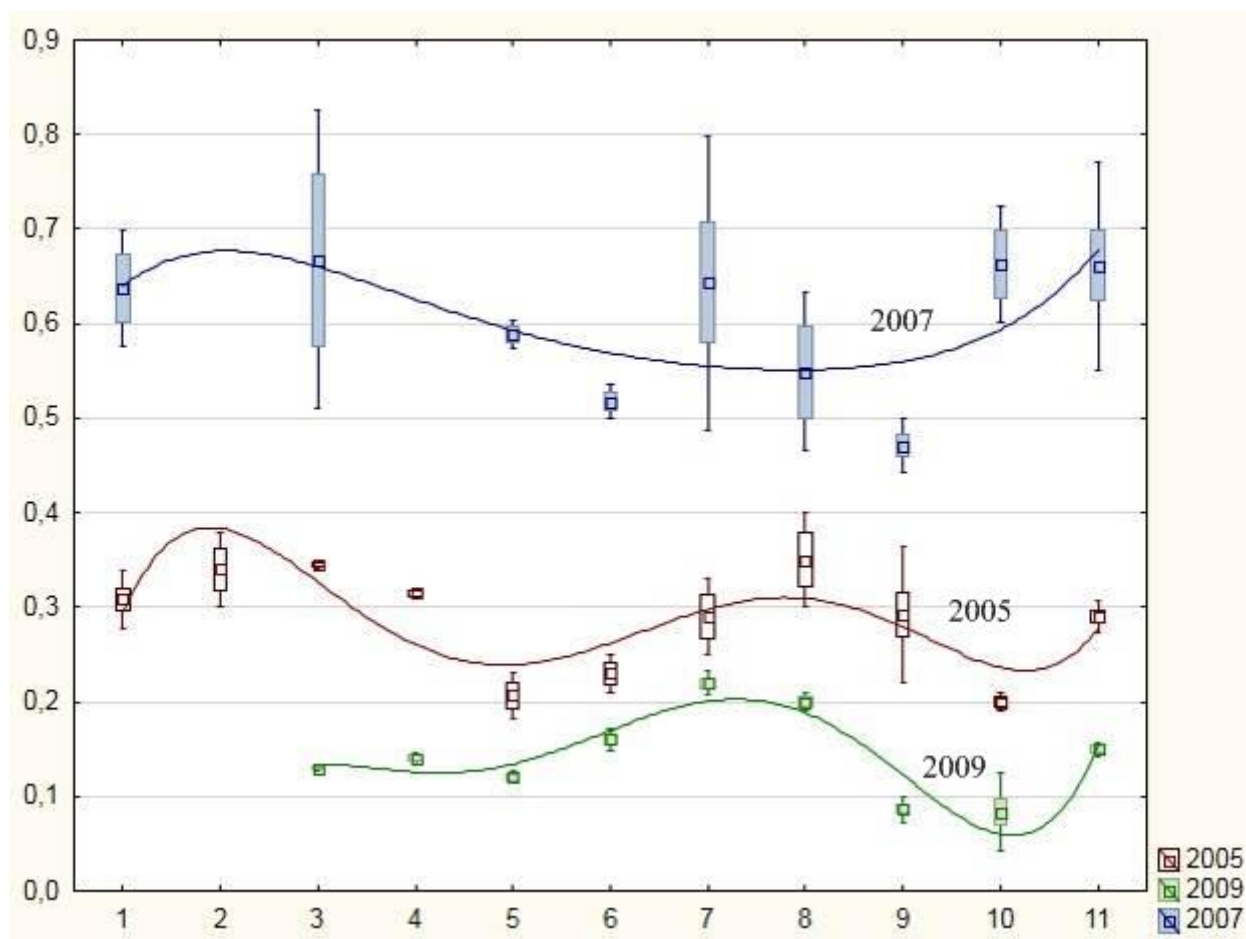


Рис. 7. Изменчивость суммарного содержания флавоноидов *Salix viminalis*

Линии – линии регрессии 5-го порядка; ось x: фенофазы; ось y: содержание флавоноидов, %, в пересчете на рутин; фенофазы №№: 1 – зимний покой, 2 – сокодвижение, 3 – набухание почек, 4 – распускание почек и развёртывание листьев, 5 – бутонизация, 6 – цветение, 7 – созревание плодов и плодоношение, 8 – рост побегов, 9 – постгенеративная вегетация, 10 – расцветивание листьев, 11 – листопад; статистики: квадрат – среднее арифметическое, ящик – его ошибка, усы – квадратичное отклонение.

Выявлена согласованная изменчивость суммарного содержания флавоноидов: в ряду фенофаз в с аномальным началом вегетационного сезона (теплая зима, теплая или дождливая весна) содержание флавоноидов в целом обратно коррелировано с температурами воздуха: $r = -0,45 - -0,70$ ($p < 0,05$). Максимальное суммарное содержание проантоцианидинов и фенологликозидов отмечено во время листопада, зимнего покоя и сокодвижения, а также во время цветения и плодоношения.

Таким образом, биотопическая изменчивость морфо-ценотических и ресурсных параметров модельных видов лекарственных растений четко согласуется с

экологическими условиями местопроизрастания. При этом характер индивидуальной, внутривидовой и межвидовой изменчивости может быть различным как в пределах одного сезона, так и в разные годы наблюдений. В целом сохраняется общий рисунок тренда изменчивости: мономодальный для урожайности, и бимодальный для суммарного содержания флавоноидов, антоцианов и проантоцианидинов на фоне, как правило, не совпадения максимальных значений удельной сырьевой фитомассы и содержания групп метаболитов.

Глава 5. Картографирование ресурсов лекарственных растений

Нами разработан алгоритм картографирования ресурсов лекарственных растений в пределах ключевого участка, а также методика ресурсоисследовательского картографирования больших территорий с использованием ключевых участков и геоботанических карт.

5.1. Картографирование растительных ресурсов на ключевом участке.

5.1.1. *Comarum palustre*. С использованием данных дистанционного зондирования составлены карты типов растительных сообществ на ключевом участке с их ранжированием по значению урожайности сырья *C. palustre* на Споровском болоте (Березовский район Брестской области). В сообществах ассоциаций *Peucedano palustris*–*Caricetum lasiocarpae*, *Equiseto fluviatilis*–*Caricetum rostratae*, *Alnion glutinosae* (*Salicetum auritae*, *Carici elongatae*–*Alnetum glutinosae*), занимающие невысокие площади (до 2 га), показана наибольшая урожайность сырья (123–209 г/м²) и плотность побегов (26–44 шт./м²) *C. palustre* с проективным покрытием более 50%. В ассоциации *Thelypterido palustris*–*Phragmitetum australis* отмечена минимальная урожайность (19 г/м²) при низкой плотности побегов (4 шт./м²) и проективном покрытии 5%. Наиболее ресурснозначимые участки на пойменном болоте формируют, занимающие большие площади, осоковые ассоциации (90–120 г/м²).

Нами проведен сравнительный анализ оценки урожайности *C. palustre*, полученной на основе интерполяции – кригинга в двух вариантах. В первом использовались данные наземного учета (100 учетных площадок (метод уколов) в пределах ключевого участка) с использованием данных спутниковой съемки и литературными данными по урожайности этого вида в разных болотных сообществах (Федоров и др., 2009; Федоров, Жигунова, Михайленко, 2013; Сысой, 2016). Анализ показал сходство результатов по запасу сырья двух методов, но различие по территориальному распределению сырьевой фитомассы внутри ключевого участка. Оценка запасов сырья *C. palustre* по данным наземного обследования составила 51,7±3,8 т воздушно-сухого сырья, а с использованием данных дистанционного зондирования – 47,5±4,4 т (различие составляет 8%). Оно связано с

различной «базовой основой» для реконструкции полей пространственной непрерывности параметра.

По нашему мнению, для более точного прогноза урожайности и запасов дикорастущих растений болотных угодий с помощью данных дистанционного зондирования необходимо создание электронного банка данных (динамических ГИС) по эталонным биотопам с установленным варьированием урожайности сырья в зависимости от метеорологических условий и гидрологического режима.

5.1.2. *Ledum palustre* и *Vaccinium vitis-idaea*. Сравнение результатов двух методических подходов (метод пробных площадей и метод уколов) по оценке урожайности *L. palustre* на верховом облесенном болоте показало: 1) сходство определения положения наиболее продуктивных биотопов, и 2) различие по детализации пространственного распределения ресурсной фитомассы. Различия, на наш взгляд, вызваны тем, что в данных методических подходах использован различный принцип: в методе пробных площадей – экстраполяция (доведение выборки меньшего размера до большей), а в методике уколов – интерполяция: приведение выборки большего размера к меньшему. Картирование болотных и лесных массивов Гродненского региона по урожайности *L. palustre* и *V. vitis-idaea* с помощью кригинга (интерполяции данных) показало достаточно высокую точность метода точек по оценке распределения урожайности в пределах ключевых участков.

5.2. Картографирование растительных ресурсов больших территорий

5.2.1. *Ledum palustre*. Модельным полигоном для исследований урожайности и запасов надземной фитомассы *L. palustre* являлась территория, размещенная в северо-западной части Республики Беларусь, в пределах Дисненского геоботанического района (Витебская область), 459,2 тыс. га. Координаты размещения тестового полигона: между (WGS-84) 56014'–56045'с.ш. и 26055'–28012'в.д. Максимальная протяженность с севера на юг – 55,5 км, с запада на восток – 79,8 км. В пределах модельного полигона нами ранее проведена оценка и картирование урожайности фитомассы *L. palustre* на болотном массиве Ельня. Нами разработан и апробирован алгоритм картографирования ресурсов *L. palustre*, состоящий из 9 этапов:

1. *Выбор и обработка материалов космической съемки.* Использована мультиспектральная съемка со спутников Landsat с разрешением позволяющим дешифровать объекты минимальной площадью 0,09 га. Обработку материалов космической съемки выполняли в ArcGIS: геопроецирование снимка в географическую систему координат WGS-84; корректировка привязки космического снимка по опорным

точкам или точному координатно-увязанному снимку; создание синтезированных цветных изображений из комбинации спектральных каналов космического снимка.

2. *Создание слоя ГИС «Торфяные болота».* Слой ГИС «Торфяные болота» основан на комплексе космических снимков с пространственным разрешением 30 м и доступной информации о расположении болотных экосистем. Информационной базой для установления расположения торфяных болот и торфяников служит официальная опубликованная информация (Торфяной фонд..., 1979), в основе которой лежат первичные данные геологических отчетов по разведке торфяных месторождений и их паспортов. Для дешифрирования лесных торфяников применяли также материалы лесоустройства, проведенного республиканским унитарным предприятием «Белгослес» в 2000–2008 гг. Привлечение материалов лесоустройства, а также экспертный поиск на основе данных дистанционного зондирования Земли позволяет дополнительно выявить торфяные месторождения и торфяники, не учтенные как торфяные болота. Это доказывает перспективу картографирования торфяных болот и торфяников с использованием различных данных (материалов лесоустройства, топографических, геоботанических карт, почвенных карт и др.) в качестве дополнения к данным разведки торфяных месторождений (Сирин и др., 2014). В результате анализа данных дистанционного зондирования и производственной информации в пределах модельного полигона выявлено 55 болот и торфяников общей площадью 48,3 тыс. га (заболоченность – 10,5%). На исследуемой территории преобладали торфяные болота с верховым типом залежи (43,1 тыс. га – 88,6%). Низинные и переходные составляли 5,5 тыс. га (11,4%)

3. *Расчет нормализованного вегетационного индекса (NDVI) и построение растровой карты.* Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) является одним из самых востребованных и используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова. Этот индекс использует контраст характеристик двух каналов из мультиспектрального набора растровых данных: в красном канале поглощается пигмент хлорофилла, а в инфракрасном канале высока отражательная способность растительности. Установлена положительная зависимость между NDVI и показателями зеленой фитомассы. NDVI характеризует также плотность растительности, позволяет оценить всхожесть и рост растений, продуктивность угодий (Walker et al., 2003). В результате обработки спектральных характеристик снимков тестового полигона нами создана растровая карта NDVI, которая в дальнейшем была использована для классификации болотных биотопов.

4. *Интерпретация показателей растительности в плане оценки ресурсной значимости.* Для составления ресурсоведческих карт мы располагали оригинальными

данными по урожайности фитомассы *L. palustre* на болотах тестового полигона за 10 лет (2004–2013 гг.). Фитомассу *L. palustre* оценивали на пробных площадях ($n > 200$) методом учетных площадок. Анализ полученных ресурсоведческих, экологических и фитоценологических параметров биотопов позволил объединить растительные сообщества в 10 эколого-ресурсных групп, характеризующиеся близкими показателями урожайности, трофности среды, уровня грунтовых вод и экологическими особенностями доминантов.

5. *Разработка каталога эталонов болотных участков.* На основе оригинальных материалов наземных исследований создали векторный слой эталонов болотных участков. Каталог эталонов включал 178 полигонов общей площадью 14,6 тыс. га (33% от общей площади болот тестового полигона).

6. *Классификация болотных угодий на основе обучающих выборок.* На основе систематизации классов (метод максимального подобия) полученного классифицированного изображения нами создана предварительная картографическая модель изучаемого участка. Число классов для болот модельного полигона – 10. Классификация проводилась в двух вариантах: 1) на основе мультиспектрального космического изображения (RGB-синтез, комбинация «естественные цвета»); 2) на основе тематической карты NDVI. Сопоставление данных визуального дешифрирования с результатами автоматической классификации, показало, что наиболее оптимальной картографической моделью является вариант классификации на основе индекса NDVI. Далее с использованием материалов натурного обследования и цифровой предварительной карты (прекарты) выполнены геометрическая и типологическая генерализации, направленная на объединении мелких (площадью < 1 га) единиц картографирования с более крупными и близкими по видовому составу типами растительных сообществ. Оконтуривание полигонов производилось автоматизировано. Полученное растровое изображение далее преобразовано в векторную форму.

7. *Построение легенды карты урожайности.* В легенде к карте урожайности *Ledum palustre* типы болотных участков систематизированы в 5 групп по средней урожайности фитомассы: 1) *L. palustre* отсутствует или его урожайности крайне низкая (проективное покрытие до 1%, урожайность до 3 г/м² возд.-сух. масса); 2) крайне низкая урожайность (проективное покрытие до 3%, урожайность до 10 г/м² возд.-сух. масса); 3) участки с малым обилием (проективное покрытие до 10%, урожайность до 25 г/м² возд.-сух. масса); 4) участки со средним запасом (проективное покрытие до 25%, урожайность до 70 г/м² возд.-сух. масса); 5) участки с высоким запасом (проективное покрытие свыше 30%, урожайность > 75 г/м² возд.-сух. масса).

8. *Создание цифровой картографической цифровой модели.* С использованием стандартных функций ArcGIS производили построение карты урожайности фитомассы на основе структуры лесного хозяйства региона, гидрологической сети, границ землепользователей, транспортных путей и населенных пунктов, а также запасов сырья *L. palustre*, что позволяет планировать заготовки сырья в регионе. По результатам исследований установлено, что на болотах модельного полигона среднегодовой запас фитомассы составил 20,7 тыс. т.

9. *Выборочная полевая проверка данных.* С целью проверки полученной картографической модели с применением GPS-навигатора проведена выборочная полевая проверка в объеме не менее 3% от числа выделов со средних и высоких запасов модельного вида, которая показала достаточно высокую точность дистанционной идентификации биотопов со средним и высоким запасом растительного сырья.

Составленные цифровые карты, по предложенному алгоритму, корректно согласуются с материалами лесоустройства, что позволяет найти им широкое применение при планировании мероприятий побочного лесопользования и организации заготовки растительного лекарственного сырья лесохозяйственными учреждениями.

5.2.2. *Комплексное ресурсоведческое картографирование лесоболотного комплекса «Дикое» (Беловежская пуца).* На основе методики картографирования ресурсов отдельных видов нами разработан алгоритм комплексной оценки растительных ресурсов отдельных территорий. Методика включает полную «технологическую цепочку» от получения космического снимка от оператора до создания с использованием геоинформационных технологий цифровых тематических карт. Ключевые звенья методики рассмотрены на примере лесоболотного комплекса (ЛБК) «Дикое» = 23,09 тыс. га. Алгоритм комплексного ресурсного картографирования, основанный на принятом в ботаническом ресурсоведении, методе ключевых участков, состоит из 4 этапов:

1. *Составление карты растительности (местообитаний)* проводилось на основе апробированных методических подходов (Груммо и др., 2015; Зеленкевич и др., 2016). Создана карта растительности лесоболотного комплекса «Дикое» (Беловежская Пуца) (Груммо и др., 2017).

2. *Интерпретация картируемых единиц (геоботанической карты или карты местообитаний) в плане оценки ресурсной значимости.* В пределах ЛБК произрастает 35 хозяйственно-полезных видов растений. На основе карты местообитаний с учётом эколого-ценотических особенностей выявленных хозяйственно-полезных растений составлена карта приоритетных мест их заготовок.

3. Составление базы данных по местам заготовки растительных ресурсов с оценкой годового запаса. По каждому из 35 выявленных в пределах ЛБК «Дикое» видов хозяйственно-полезных растений на основе оригинальных, лесотаксационных и научных литературных источников создана база данных по урожайности выявленных растений с учетом их биотопической встречаемости. Оценку площадей мест перспективных заготовок сырья проводили с использованием ArcGIS. На основе метода ключевых участков проводили экстраполяцию данных по урожайности каждого вида на все его местопроизрастания и расчёт запаса сырья.

Анализ результатов исследований показал, что в границах ЛБК «Дикое» наибольшим ресурсным потенциалом характеризуются (т. возд.-сух. сырья): *Filipendula ulmaria* (618,1), *Menyanthes trifoliata* (571,2), *Betula* spp. (337,9), *V. myrtillus* (плоды – 381,1; побеги – 238,2), *V. vitis-idaea* (плоды – 118,6; побеги – 237,1), *C. palustre* (82,8), *Frangula alnus* (206,6), *Oxycoccus palustris* (45,0).

4. Выборочная полевая проверка данных. С целью валидации полученной картографической модели с применением проведена выборочная полевая проверка, которая показала достаточную точность дистанционной ресурсной идентификации местообитаний. Необходима обязательная коррекция оценки значимости ресурснозначимости биотопов с учетом планирования лесохозяйственных мероприятий.

5.2.2.1. Картографирование ресурсов *Menyanthes trifoliata*. На основе полевых данных и ГИС ЛБК «Дикое» с использованием авторских разработок по ресурсному картографированию нами проведена детальная оценка урожайности и запасов сырья *M. trifoliata*. Наземные изыскания проведены на основе предэкспедиционного планирования по созданной ранее карте растительности (Созинов, Сысой, Груммо, 2018) и карты потенциальных мест заготовок ресурсно-значимых видов. Оценка урожайности листьев *M. trifoliata* проведена методом учетных площадок ($n = 196$). Относительная невысокая ошибка оценки урожайности сырья (9–16%) свидетельствует о достаточной точности выявленного параметра.

Ресурсными изысканиями охвачено 25% территории, что является достаточным для метода ключевых участков. Далее с учетом встречаемости *M. trifoliata* в ключевых ресурснозначимых биотопах проведена оценка запасов растительного сырья. На основе карты растительности, полевых и камеральных данных созданы тематические ресурсно-ценотические карты по *M. trifoliata*. Результаты проведенной работы показали, что наиболее ресурснозначимые ценозы по урожайности листьев *M. trifoliata* – это разнотравно-волосистоплодноосоковые сообщества на низинных болотах и осоково-сфагновые сообщества на переходных болотах, образующие одну совокупность по

урожайности (рис. 8). Учитывая относительно высокое суммарное содержание флавоноидов в листьях *M. trifoliata* (0,54–1,6%), осоково-сфагновые сообщества на переходных болотах являются оптимальными для заготовки сырья. Высокотравные болотные сообщества на низинных болотах относятся ко второй группе урожайности *M. trifoliata* и минимальная урожайность отмечена в лесных болотах. При этом достоверных различий между урожайностью в чернольшанниках и разнотравно-тростниковых болотах нет. Это свидетельствует о том, что *M. trifoliata* формирует синэкологический оптимум в открытых болотных биотопах. Это подтверждает совпадение высокого обилия и встречаемости *M. trifoliata* на волосистоплодноосоковых болотах.

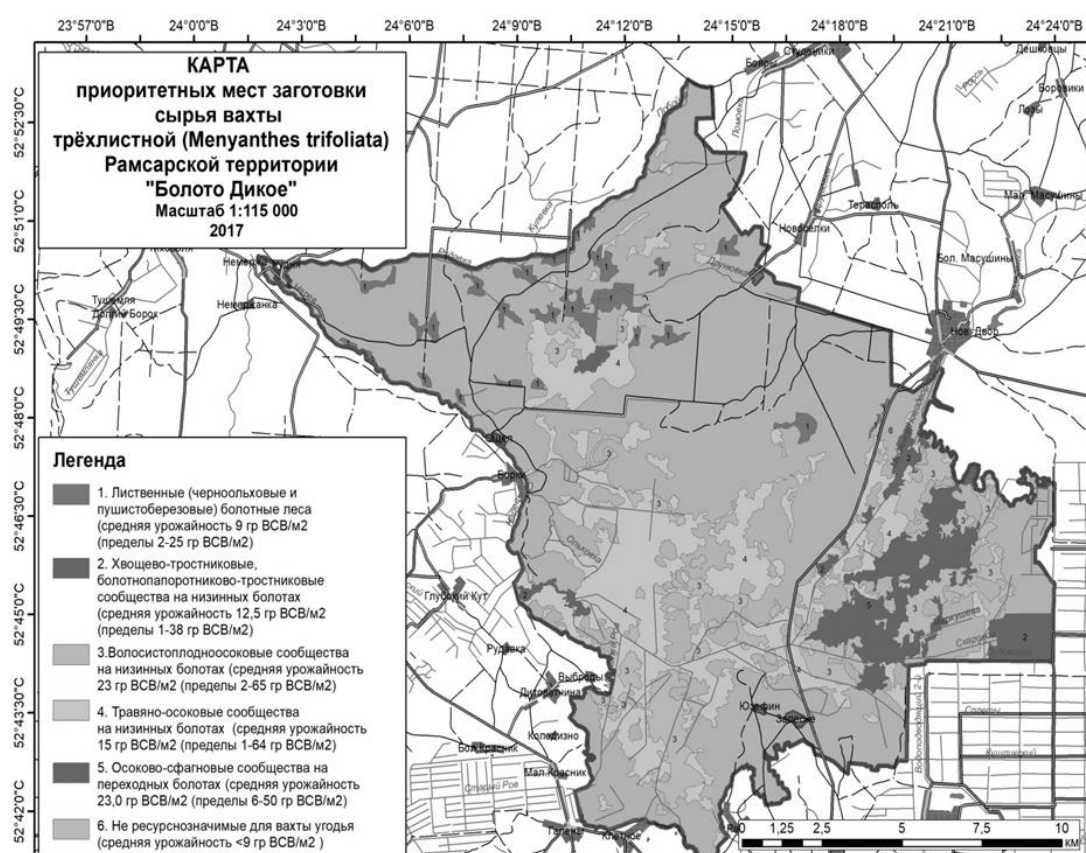


Рис. 8. Карта ресурснозначимых местообитаний *Menyanthes trifoliata*

Таким образом, ресурсное картирование в пределах ключевого участка, а также больших территорий, на основе информационных технологий, классификации растительности, данных наземного и дистанционного зондирования ресурснозначимых растительных сообществ дает возможность проводить корректной оценки пространственного распределения урожайности и запасов сырья. На основе полученных результатов сформулированы практические рекомендации для оперативного управления ресурсами хозяйственно-полезных видов.

ВЫВОДЫ

1. Ранжирование диапазонов экологических амплитуд всех видов растений фитоценоза и расчет регрессии по градиенту значений их экологического минимума и максимума позволили дифференцированно оценить факторы среды.
2. На основе анализа существующих геоботанических и ресурсоведческих методик определены эффективные подходы к популяционной оценке ресурсных видов и их местообитаний. Составлены регрессионные уравнения связи фитомассы и обилия для модельных видов, которые не являются стабильными в пространстве и времени и могут использоваться на региональном уровне (R^2 варьирует у модельных видов от 0,5 до 0,95). Для ресурсозначимых ценопопуляций лекарственных растений (при обилии более 10%) результативными для экспресс-оценки количества сырья являются линейные уравнения и асимптотические функции (распределение Вейбулла).
3. Максимальная урожайность модельных видов формируется в условиях близких к синэкологическому оптимуму. Показано, что на уровне биотопов высокие суммарные содержания вторичных метаболитов в сырье не совпадают с высокой урожайностью и приурочены к субоптимальным условиям.
4. Для изученных суммарных содержаний вторичных метаболитов (флавоноидов, фенольных соединений, проантоцианидинов, антоцианов и др.) на временном и эколого-ценотическом градиентах сохраняется бимодальный тренд изменчивости. В частности, у *Salix viminalis* выявлен бимодальный характер накопления биологически активных веществ в коре побегов с их разногодичным изменением в 2–6 раз, при этом бимодальность выражается в виде двух пиков сезонного накопления изученных соединений приходящиеся на две группы фенофаз: листопад–зимний покой–сокодвижение и цветение–созревание плодов–плодоношение.
5. Использование принципа интерполяции как способа нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений, в ресурсном картографировании дает более надежную оценку урожайности и запасов сырья, а также его пространственного распределения. На примере *Comarum palustre* показано, что принцип интерполяции позволяет использовать литературные экспертные данные по урожайности и дистанционные методы оценки запаса сырья на ключевых участках.

6. Разработанный набор алгоритмов создания тематических ресурсоведческих карт (урожайности, запаса, обилия, встречаемости) и карт приоритетных мест заготовок по лекарственным растениям позволяет оперативно оценить ресурсный потенциал крупных территорий.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ для защиты докторских диссертаций

1. Бузук Г. Н., Созинов О. В. Оптимизация точности учета проективного покрытия при использовании квадрата-сетки // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2013. Т. 22. № 3. С. 5–7.
2. Бузук Г. Н., Созинов О. В. Методы учета проективного покрытия растений: сравнительная оценка с использованием фотоплощадок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014а. Т. 16. № 5 (5). С. 1644–1649.
3. Бузук Г. Н., Созинов О. В. Оптимизация метода оценки обилия и площади зарослей лекарственных растений // Растит. ресурсы. 2014б. Т. 50. Вып. 2. С. 316–323.
4. Груммо Д. Г., Созинов О. В. Создание ресурсных карт *Ledum palustre* (Ericaceae) на основе геоинформационных технологий // Растит. ресурсы. 2015. Т. 51. Вып. 4. С. 564–582.
5. Созинов О. В. Ресурсная характеристика ценопопуляций *Vaccinium vitis-idaea* (Vacciniaceae) в Гродненской области (Республика Беларусь) // Растит. ресурсы. 2014. Т. 50. Вып. 3. С. 337–346.
6. Созинов О. В. Информационные технологии в ботаническом ресурсоведении: результаты и перспективы // Растит. ресурсы. 2015а. Т. 51. Вып. 3. С. 449–462.
7. Созинов О. В. Морфологические и ресурсные характеристики *Calluna vulgaris* (Ericaceae) в нарушенных фитоценозах северо-запада Республики Беларусь // Растит. ресурсы. 2015б. Т. 51. Вып. 4. С. 473–490.
8. Созинов О. В. Оптимизация оценки урожайности сырья *Ledum palustre* (Ericaceae) на ключевом участке // Растит. ресурсы. 2015в. Т. 51. Вып. 2. С. 213–220.
9. Созинов О. В., Бузук Г. Н. Оптимизация геоботанического метода уколов в условиях масштабирования площади учета // Научные ведомости БелГУ. Серия Естественные науки. 2014. Т. 28. № 17. С. 64–69.
10. Созинов О. В., Груммо Д. Г. Эколого-ценотическая и ресурсоведческая характеристика *Comarum palustre* (Rosaceae) в условиях пойменного болота Споровское (Республика Беларусь) // Растит. ресурсы. 2016. Т. 52. № 3. С. 321–338.

11. Созинов О. В., Кузьмичева Н. А. Сезонная и разногодичная изменчивость содержания биологически активных веществ в коре *Salix viminalis* (Salicaceae) в Беларуси // Растит. ресурсы. 2016. Т. 52. № 4. С. 610–619.
12. Созинов О. В., Кузьмичева Н. А. Ресурсно-фитохимическая изменчивость и биоэкологическая характеристика *Vaccinium vitis-idaea* (Ericaceae) в сосняке мшистом на орографическом градиенте (Республика Беларусь) // Растит. ресурсы. 2016. Т. 52. Вып. 2. С. 202–214.
13. Яновский А. А., Созинов О. В. Автоматизированная дистанционная экспресс-оценка расположения зарослей *Phragmites australis* перспективных для заготовки энерготехнологической фитомассы // Растит. ресурсы. 2017. Т. 53. № 4. С. 555–580.
14. Thiele A., Liaščynskaya N., Broska T., Bärish S., Skuratovič A., Dubovik D., Stepanovič J., Ermolenko G., Sozinov O., Sakovič A. Belarus Peatland Database // Phytocoenologia. 2015. Т. 45. № 4. С. 399–400.

Монографии:

1. Груммо Д. Г. Флора и растительность ландшафтного заказника «Ельня» / Д. Г. Груммо, О. В. Созинов, Н. А. Зеленкевич и др.; под ред. академика Н. Н. Бамбалова, Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т экспериментальной ботаники. Минск, 2010. 200 с.
2. Зеленкевич Н. А. Флора и растительность верховых болот Беларуси / Н. А. Зеленкевич, Д. Г. Груммо, О. В. Созинов, О. В. Галанина; под ред. А. В. Пугачевского; Ин-т экспериментальной ботаники. Минск: СтройМедиаПроект, 2016. 244 с.
3. Растительность и биотопы национального парка «Нарочанский» с картой наземной растительности (М 1:60 000) и картой биотопов (М 1:60 000) / Д. Г. Груммо [и др.] // ГНУ «ИЭБ НАН Беларуси», РЦККБ, ГПУ «Национальный парк «Нарочанский»; под науч. ред. А. В. Пугачевского. Минск: Колорград, 2017. 81 с. + 1 электрон. опт. диск.

Публикации в других изданиях:

1. Белова Е. А., Матюх М. А., Созинов О. В. Гидрохимическая характеристика воды верхового болота в условиях ландшафтного заказника // Экологические проблемы природных и урбанизированных территорий: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. (Астрахань, 21–22 мая 2015 г.). Астрахань, 2015. С. 6–8.
2. Благушка, М. М., Созинов О. В. Фитохимическая изменчивость лекарственного растительного сырья *Calluna vulgaris* на экологических градиентах // Актуальные проблемы экологии: материалы X междунар. науч.-практ. конф. (Гродно, 1–3 окт.

- 2014 г.). В 2 ч. Ч. 1 / ГрГУ им. Я. Купалы [и др.]; редкол.: В. Н. Бурдь (гл. ред.), О. В. Янчуревич, А. В. Рыжая. Гродно: ГрГУ, 2014а. С. 10–12.
3. Благушка М. М., Созинов О. В. Эколого-ценотическая и ресурсная характеристика ценопопуляций *Calluna vulgaris* (L.) Hull // Матер. I Междунар. практ. конф. по лекарственным растениям. Гродно, 2014б. С. 167.
 4. Бузук Г. Н., Созинов О. В. Фитоиндикация: применение регрессионного анализа // Вестник фармации. 2007. № 3. С. 44–50.
 5. Бузук Г. Н., Созинов О. В. Регрессионный анализ в фитоиндикации (на примере экологических шкал Д.Н. Цыганова) // Ботаника (исследования): сб. науч. тр. 2009. Вып. 37. С. 356–362.
 6. Бузук Г. Н., Созинов О. В. Моделирование точности определения проективного покрытия растений // V Всероссийская геоботаническая школа-конференция с международным участием (4–9 октября 2015 г.). Санкт-Петербург, 2015. С. 37.
 7. Бузук, Г. Н., Созинов О. В., Цвирко Р. В. Лимитирующие факторы для фитоценозов: технология оценки (на примере сосновых лесов Центральной Беларуси) // Социально-экологические технологии (Вестник МГГУ им. М. А. Шолохова). 2017. № 1. С. 27–40.
 8. Груммо Д. Г., Зеленкевич Н. А., Созинов О. В., Броска Т. В. Растительность верховых болот Беларуси: география, картографирование, классификация и охрана // Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны. Материалы международного научно-практического семинара (Минск, Беларусь, 30.09 – 01.10.2009 г.). Минск, 2009. С. 127–137.
 9. Груммо Д. Г., Ильючик М. А., Зеленкевич Н. А., Созинов О. В. Опыт геоботанического и экологического картографирования растительности (на примере лесоболотного комплекса Ельня) // Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны. Материалы международного научно-практического семинара (Минск, Беларусь, 30 сентября – 1 октября 2009 г.). Минск, 2009. С. 138–151.
 10. Груммо Д. Г., Цвирко Р. В., Русецкий С. Г., Зеленкевич Н. А., Жилинский Д. Ю., Мойсейчик Е. В., Созинов О. В. Современное состояние и основные направления динамики растительного покрова лесоболотного комплекса «Дикое» // Беловежская пуца. Исследования. 2017. Вып. 15. С. 55–75.
 11. Крылова Н. Ю., Созинов О. В. Зависимость морфометрических параметров листьев *Vaccinium vitis-idaea* от экологических режимов фитоценозов // Актуальные проблемы экологии: материалы VII Международной научно-практической конференции (Гродно, 26–28 октября 2011 г.). Гродно, 2011. С. 36–38.

12. Крылова Н. Ю., Созинов О. В. Морфометрическая изменчивость листьев *Vaccinium vitis-idaea* на эколого-ценотических градиентах // Состояние природной среды Полесья и сопредельных территорий: сборник материалов Международной науч.-практ. конф. студентов, магистрантов и аспирантов (Брест, 23–24 марта 2012 г.). Брест, 2012. С. 34–35.
13. Матюх М. А., Белова Е. А., Созинов О. В. Геоботаническая характеристика болотных фитоценозов в условиях ландшафтного заказника «Озёры» // Научная Украина: сборник материалов Всеукраинской студ. науч. конф. с междунар. Участием (Днепропетровск, 25 мая 2015 г.). Днепропетровск, 2015. С. 67–70.
14. Созинов О. В. Согласованная изменчивость морфологических параметров и фитохимического состава листьев *Vaccinium vitis-idaea* // Биодиверситиология: современные проблемы изучения и сохранения биологического разнообразия: сборник научных статей IV Международной научно-практической конференции. Чебоксары: Новое время, 2012. С. 70–72.
15. Созинов О. В. Оптимизация методов оценки и прогноза ресурсов лекарственных растений // Ботаническая наука в России: история и современность, посвященной 100-летию Русского ботанического общества: тезисы докл. Всерос. науч.-истор. конф., посвящ. 100-летию Русского ботанического общества, 1915–2015 (Санкт-Петербург, 26–29 апр. 2016 г.). СПб., 2016. С. 150–152.
16. Созинов О. В., Бузук Г. Н. Определение ресурсных показателей растений: регрессионные зависимости и проективный вес *Vaccinium vitis-idaea* // Социально-экологические технологии. 2017а. № 4. С. 9–26.
17. Созинов О. В., Бузук Г. Н. Регрессионные модели для экспресс-оценки урожайности растительного сырья // Современные проблемы экспериментальной ботаники: материалы I Международной научной конференции молодых учёных, приуроченной Году науки в Республике Беларусь (Минск, 27–29 сентября 2017 г.). Минск, 2017б. С. 29–33.
18. Созинов О. В., Груммо Д. Г. Ресурсное картографирование багульника болотного (*Ledum palustre*) на верховых болотах Беларуси // Болота и проблемы его использования: тезисы докладов научного семинара (21.10.2015 г., РГО, Санкт-Петербургское отделение). СПб, 2015. С. 10–12.
19. Созинов О. В., Груммо Д. Г. Картография в ботаническом ресурсоведении: результаты и перспективы // Материалы IV (XII) Междунар. ботанич. конф. молодых учёных (Санкт-Петербург, 22–28 апр. 2018 г.). СПб., 2018. С. 62–64.

20. Созинов О. В., Кузьмичева Н. А., Бузук Г. Н. Ресурсно-фитохимический оптимум заготовки лекарственного растительного сырья // Современная ботаника в России. Труды XIII съезда Русского ботанического общества и конференции «Научные основы охраны и рационального использования растительного покрова Волжского бассейна» (Тольятти, 16–22 сентября 2013). Т. 3. Тольятти, 2013. С. 89–90.
21. Созинов О. В., Сысой И. П., Груммо Д. Г. К вопросу комплексного картирования потенциальных мест заготовок растительных ресурсов (на примере лесоболотного комплекса «Болото Дикое») // Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны: материалы III Междунар. науч. семинара (Минск–Гродно, 26–28 сент. 2018 г.). Минск, 2018. С. 129–136.
22. Созинов О. В., Филипчик П. П. Сравнительный анализ методик определения обилия и ресурсной фитомассы брусники (*Vaccinium vitis-idaea*) // Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию ВНИИОЗ им. проф. Б. М. Житкова (Киров, 22–25 мая 2017 г.). Киров, 2017. С. 625–627.
23. Созинов О. В., Яновский А. А. Оперативная оценка по спутниковым снимкам пригодности фитоценозов на торфяниках к заготовке надземной фитомассы // VIII Галкинские Чтения: материалы конф. (Санкт-Петербург, 2–3 февр. 2017 г.). СПб., 2017. С. 108–111.
24. Цвирко Р. В., Созинов О. В. Экологическая дифференциация сосновых типов леса подзоны грабово-дубово-темнохвойных лесов // Проблемы лесоведения и лесоводства: сборник научных трудов ИЛ НАН Беларуси. 2010. Вып. 70. С. 158–165.
25. Яковлева И. М., Созинов О. В. Фитохимическая характеристика ценопопуляций *Calluna vulgaris* (L.) Hull // Современные экологические проблемы устойчивого развития Полесского региона и сопредельных территорий: наука, образование, культура: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (Мозырь, 26–27 сент. 2007 г.) В 3 ч. Ч. 2. / Мозырский гос. пед. ун-т им. И. П. Шамякина; редкол.: В. В. Валетов (гл. ред.) [и др.]. Мозырь: МГПУ им. И. П. Шамякина, 2007. С. 171.
26. Kuzmicheva N. A., Sozinov O. V. The content of biologically active substances in *Salix* spp. (Eastern Europe): the patterns of alteration // Renewable Wood and Plant Resources: Chemistry, Technology, Pharmacology, Medicine: The International conference (June 21–24, 2011, St. Petersburg). St. Petersburg, 2011. С. 268–269.