

УДК 58.02+58.056+58.055+58.03+58.087+58.084

**ХРОМАТО-АУКСАНОМЕТРИЯ
И ХРОМАТО-МАСС-АУКСАНОМЕТРИЯ
В ФЕНОЛОГИЧЕСКОМ СТАДИЙНОМ МОНИТОРИНГЕ
ЛЕСНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ФЛЕЙВО- И ГАЗОХИМИЧЕСКИХ
ПРИНЦИПОВ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ
ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ ПАТТЕРНОВ***

© *О.В. Градов, мл. науч. сотр., вед. инж.*

Институт энергетических проблем химической физики РАН, Ленинский пр-т, д. 38, корп. 2, Москва В-334, Россия, 119334; e-mail: o.v.gradov@gmail.com

Предложена новая идеология объективных ауксанометрических измерений, позволяющая анализировать динамику роста с дифференциацией по стадиям развития. В основу нового типа измерений заложен длительный мониторинг с привлечением методов оптического анализа, «прямой» масс-спектрометрии и газовой хроматографии. Предложено, опираясь на известные одорологические различия запахов цветущих растений на разных точках фенологического мониторинга и используя флейво- и газохимические подходы, различать стадийную динамику различных видов и групп растений, анализировать и автоматически классифицировать древесные растения в модельных фитосообществах на феноритмотипы/фенологические группы на основе данных указанных методов и в рамках данного подхода с привлечением машинного распознавания образов и автоматического фингерпринтинга. Возможно феноспектральное ранжирование полученных данных при поиске зависимостей роста и фенологии стадийного развития от факторов среды. На практике данный метод является внутреннеюстируемым, так как одновременно базируется на нескольких отличных источниках измерений, что позволяет использовать его как в лабораторных условиях или климатических камерах, так и в естественных полевых условиях при эргономичном размещении аппаратуры аналогично средствам метеоролого-климатического мониторинга, монтируемым в метеобудке. Предложено принципиально отличная от известных в ботанической и лесотехнической практике ауксанометрическая система, которая позволяет наблюдать за первичным ростом лесных пород в контексте развития за счет того, что индикатором динамики является не количественный (как в обычной ауксанометрии, где единственным критерием роста является удлинение проростка), а комплексно-качественный критерий, складывающийся из взаимно-однозначного сопоставления результатов аналитико-химического анализа молекулярной эмиссии растений и вариаций характеристик среды, что позволяет анализировать обратные связи роста/развития растения и деформаций параметрики внешней среды. В ходе

* Автор выражает благодарность сотрудникам Отдела метрологии средств измерений ГЕОХИ РАН и Лаборатории высокотемпературной кинетики и газовой динамики ИХФ РАН за доступ к технике в процессе написания работы. Выражается общая благодарность всем студентам-практикантам ИХФ РАН, участвовавшим в сборке установки, публикация материалов о которой с их участием предполагается в ближайшее время, а также коллегам из США и Китая, с которыми поддерживалась переписка на момент написания обзора.

работы в различных режимах посредством обучения распознаванию образов с пополнением базы данных можно исследовать и моделировать не только один паттерн развития растения, но и экспериментальный отклик экологической структуры признаков на изменение параметров среды, т. е. по мере необходимости переходить к фенологическому, модельно-биогеографическому, биометеорологическому, био-климатологическому, эколого-физиологическому подходам (если таковые позволяют параметры биотрона, климатической камеры, оранжереи, в которых производится выгонка проростков лесных пород), заноса спектральные и хроматографические данные в виде корреляционных паттернов в базы данных для последующего сличения. Феноспектральная экспериментальная выгонка позволяет программировать и с помощью обратной связи регулировать температуру, четко прогнозируя начало вегетации посредством суммирования эффективных температур или выявления их тренда, позволяющего реконструировать последовательность всхода или вегетации отдельных растительных форм в корреляции с характеристическими параметрами искусственного климата, автоматически классифицировать по комплексу характеристик на феноритмотипы или фенологические группы древесные растения в модельных фито-сообществах по более шкалированной градации, чем в устаревшей системе Морозовой, выделявшей только два феноритмотипа у древесных растений (вечнозеленые и листопадные), позволяет работать в режиме регуляции параметрики климатической камеры путем регистрации обратной связи растений за счет использования детекторов и датчиков их молекулярной эмиссии в контролируемом физическом окружении, т. е. сами параметры, регистрируемые детектирующей частью установки, могут представлять собой сигнал для изменения режима ее функционирования.

Ключевые слова: флейвохимия, газохимия, оптическая спектроскопия, ауксанометрия, газовая хроматография, газовая хромато-масс-спектрометрия, феномониторинг.

Историко-технический экскурс

Как известно, классическим и стандартным принципом измерения роста проростков древесных пород является ауксанометрия с использованием различных ауксанометров или их аналогов с автоматической записью – ауксанографов*. Простейшие регистрирующие ауксанометры были разработаны в конце XIX в. [11, 25, 57, 136] и впервые усовершенствованы в первой четверти XX в. [19, 20, 98]. Новейшие по тем временам конструкции уже обладали чувствительностью порядка микрон и допускали использование для корреляционных измерений ростовых характеристик в сопоставлении с изменениями состава атмосферы. За указанное время, начиная с 1884 г., журнал «*Österreichische botanische Zeitschrift*» неоднократно публиковал отчеты, в которых упоминалось об использовании подобных приборов в конкретных организациях

* Тем не менее, методы регистрации с использованием ауксанографов также называются ауксанометрией, а не ауксанографией, так как ауксанографией в биологии называют биохимические методы в микробиологии, связанные с использованием ауксотрофных мутантов при определении действия различных препаратов или выявлении оптимальных сред для культивации микроорганизмов.

или публикациях [27, 52, 97, 114]. Высокотехнологичную по меркам начала XX в. модель хронографического ауксанометра можно, в частности, обнаружить во втором томе (1903 г.) классической «Физиологии растений» Пфеффера (рис. 1, *а*). Данная конструкция, не считая хронографической части, работала по принципу весов с противовесом, уровень которого изменялся при росте растения. Менее известный прецизионный ауксанометр Бови (рис. 2 *а, б*) отличался от нее по устройству так же, как безмен от весов с противовесом, но фактически не отличался по принципу измерений. На том же «гравиметрическом» подходе основывались конструкции распространенного в начале XX в. студенческого ауксанометра системы Харкута, выпускавшиеся фирмой Кнотта в Бостоне (рис. 2, *в*) и представлявшего собой разновидность дугового ауксанометра (см. рис. 1, *з*), а также ботанического записывающего измерителя фирмы Пальмера 30-х гг. (рис. 2, *г*).

Данные принципы устройства сохранялись практически неизменными до 1950-х гг., когда в Европе и США стал набирать силу тренд на автоматизацию лабораторного оборудования и применение электроники и оптоэлектронных и морфометрических способов детектирования роста.

Рис. 1. Устаревшие ауксанометрические конструкции: *а* – конструкция из монографии Пфеффера (1903 г.), *б* – ауксанометр/ауксанограф из статей БСЭ (1950 г. и 1970 г.), *в* – ауксанометр, аналогичный прибору Пфеффера, *з* – дуговой ауксанометр

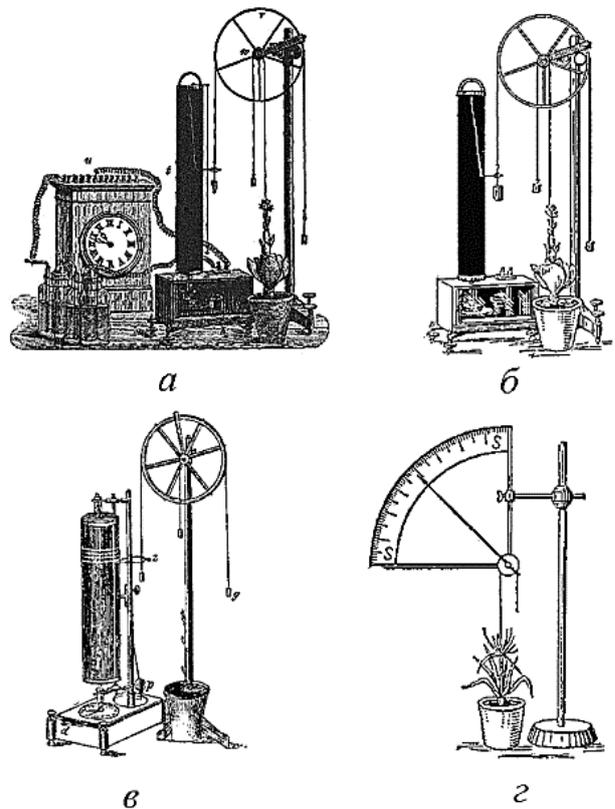
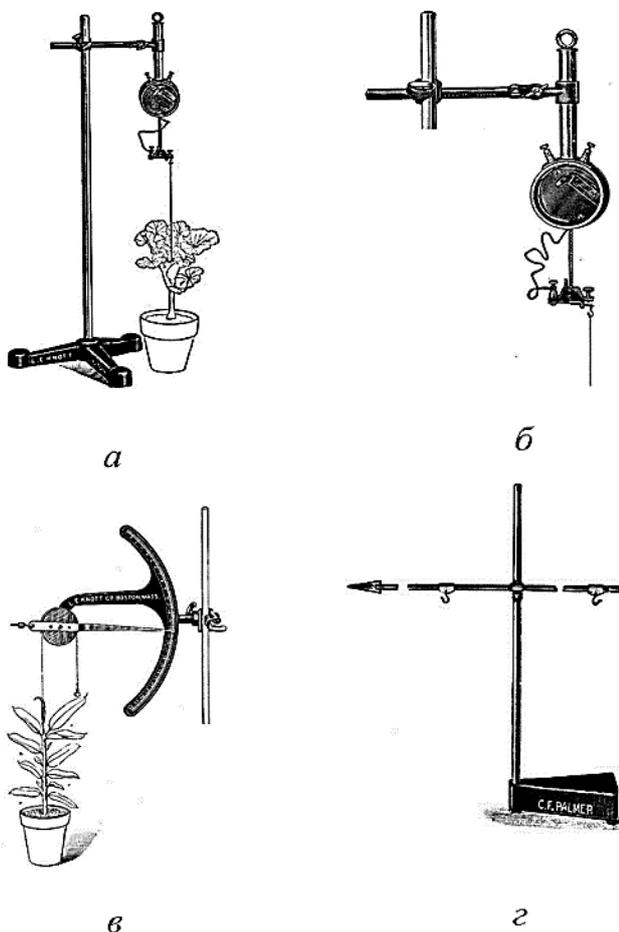


Рис. 2. Ауксанометры начала/первой половины XX в.: *а*, *б* – прецизионный ауксанометр Бови (Bovie Precision Auxanometer) по каталогу «Knott Apparatus Company: Scientific Instruments, Catalogue 26» (1921 г.); *в* – учебный/студенческий ауксанометр Харкута, выпускавшийся фирмой Кнотта в Бостоне (тот же каталог); *г* – Botanical Recording Lever (по каталогу «Palmer Research and Students' Apparatus for Physiology, Pharmacology, Psychology, Bacteriology, Phonetics, Botany etc.» (1934 г.)



Однако в отечественную практику этот тренд пришел значительно позднее. Для сравнения (см. рис. 1, *б*) приведен пример внешнего вида ауксанометра из 3-го тома Большой советской энциклопедии (1950 г.). Можно видеть, что он практически эквивалентен или даже упрощен по отношению к аппарату Пфедфера. Однако точно такая же конструкция была воспроизведена впоследствии во 2-м томе за 1970 г., поскольку конструкция применявшихся в отечественной практике ауксанометров до последней четверти XX в. фактически не отличалась от зарубежных прототипов начала века. Если еще в конце XIX в., когда подобные приборы в России называли авксанометрами, поставившиеся или конструировавшиеся по аналогии приборы оснащались циферблатами или метрическими шкалами (пример такого устройства с нижней циферблатной шкалой, заимствованный из 1-го тома (1890 г.) Энциклопедического словаря Брокгауза и Ефрона (рис. 1, *в*), то впоследствии большинство описывавшихся в отечественных работах аппаратов не дотягивало по степени механизации и прецизионности до многих устаревших зарубежных приборов

[19, 20], являясь зачастую не ауксанографами, как дефинировались аппараты, показанные на рис. 1, в, а модифицированными рутинными ауксанометрами. И если к ряду первых микрометрических ауксанометров пристраивался горизонтально располагаемый микроскоп, то по отношению к упрощаемым модификациям его использование не было метрологически целесообразным, так как точность графической регистрации динамики роста на дуге диска или барабане с регистрирующей бумагой, достигаемая посредством использования ауксанометрического рычага, подобного рычажку Энгельмана, зачастую до сих пор используемому в распространенных в отечественной практике кимографах, не могла быть сопоставимой с точностью микрометрических измерений. Однако многие отечественные исследователи того времени предлагали модификации ауксанометров и конструировали ауксанометрические приборы на альтернативных принципах. Так, в 20-х гг. XIX в. русский эмигрант В.В. Лепешкин описал применимость ауксанометрии к *Thallophytes* в работе [91], а советский биолог и основатель фитогормональной теории тропизмов Н.Г. Холодный разработал ауксанометр для анализа роли воды (т. е. роли тургора, гуттации и транспирации) в росте и тропизмах высших растений, названный им микропотометром [31] (этот прибор использовался в ключевых экспериментах Н.Г. Холодного по воздействию растительных гормонов на тропизмы). Впоследствии Вент – второй создатель фитогормональной теории тропизмов, известной в настоящее время за рубежом как теория Вента–Холодного, также апеллировал к ауксанометрии в своей более поздней статье (1933 г.) [145].

Следует отметить, что впоследствии конструкции гидрометрических ауксанометров неоднократно применялись в ирригационно-лесоводческих и прикладных ботанических работах [43, 87, 105, 133], связанных с гидратацией/дегидратацией и гуттацией растительных форм в природе, но, как правило, за редким исключением, ссылки на первую статью Холодного в них отсутствуют. Иногда в качестве среднего контроля в полевой ауксанометрии в подобных работах использовали лизиметры, что позволяло говорить о «корреляционной ауксанометрии», т. е. о переходе от выявления цитофизиологических механизмов роста отдельного растения к эколого-климатическим и фенологическим методам мониторинга в масштабных полевых условиях, однако этот подход был слишком трудоемок для внедрения компьютерных сетей сбора данных и поэтому не применялся на практике. В связи с этим временные масштабы ауксанометрических измерений до конца XX в. были также относительно малы и позволяли наблюдать только рост, но не развитие растений, а также не могли быть использованы для анализа периодизации вегетации, фенологических фаз и стадий роста в корреляции с условиями внешней среды.

Начиная с 70-х гг. XX в. в работах, апеллирующих к ауксанометрии, постоянно увеличивался физиолого-экологический тренд на выявление реактивности роста к данным условиям среды. Это было связано с появлением расширенных возможностей измерений в этой среде за счет появления доступных датчиков и приборов регистрации физических и химических параметров.

Так, в работе [125] был поставлен вопрос о субституировании (частичном) функций ауксинов стимуляцией ионами водорода (pH) и углекислым газом, концентрация которого, как и pH, характеризует редокс-баланс в геобиологических системах. В работе [71] произведен анализ механической реактивности и адаптивной компенсации трибологического воздействия на рост проростка; обнаруженный механизм получил название «thigmomorphogenesis». В работе [102] произведен сравнительный анализ непосредственного воздействия раствора кислоты и индуцирующего закисление плазмы клетки (за счет гиперсекреции H⁺) синтетического агента – фузикокина, дающего так называемое FC-индуцированное удлинение. Впоследствии появились дополнительные данные в пользу гипотезы о воздействии гормон-индуцированной модификации pH при клеточной стенке на кинетику роста [44]. Затем эти результаты были скоррелированы с данными о функции электрогенных ионных помп [77]; тем самым было в общем доказано единство процессов проведения электрического сигнала (биоэлектрогенеза) и роста/морфогенеза растений. Так как применение цейтрафферной регистрации [109] с тайм-кодом позволяло взаимно однозначно сопоставить каждому положению роста или тропизма проростка состояние того или иного физико-химического параметра, можно было составить комплексную картину мультипараметрической кинетики роста для каждого вида, сорта или породы древесных растений, но ввиду отсутствия доступной компьютерной аналитической техники на тот момент это не было сделано.

В 90-х гг. XX в. на смену ауксанометрам устаревших конструкций пришли электронные системы с высоким временным разрешением – видеодигитайзеры [45] на базе цифровых ПЗС*-камер [32, 135] и прецизионные механо-электрические измерители с использованием угловых преобразователей [34]. На конец 1990-х – начало 2000-х гг. приходится и развитие в высшей степени прогрессивного метода – лазерной интерференционной ауксанометрии [22, 23] (впервые дуплексная лазерная оптическая система в ауксанометрии при разных параметрах pH и удельной электропроводности среды, осмотически воздействующей на клетки, была использована в 1979 г. [137]). Уже в 90-х гг. целевая направленность установок и систем автоматизированной ауксанометрии сместилась к измерению роста в корреляции с условиями среды [47, 69]. Новый ренессанс ауксанометрии с применением расширенного компьютерного анализа изображений [132] позволяет взаимно однозначно сопоставлять (так называемые one-to-one mapping) зоны реактивности к различным факторам и зоны различной интенсивности роста в присутствии этих факторов, создавая тем самым мультимодальный подход к анализу ростовых данных. В частности, можно производить спектрозональные колориметрические измерения поверхности растений, анализировать фурье-спектры изображений на предмет анизотропии, картировать усвоение излучения по изофотам и с помощью картирования градиента или ASCII-преобразования пиксельных

* Прибор с зарядовой связью.

данных строить векторные поля динамики растений по технологии motion compensation. Таким образом, новый мощный инструмент отчасти способен заменить биохимические принципы анализа ростовых свойств, распространенные в 80–90-х гг. XX в. [46, 80, 111], методами неразрушающего контроля, функциональными и при мониторинге в режиме реального времени *in vivo* или *in situ*. Однако перекрыть необходимый критический диапазон средств биохимического анализа цифровая фотография, даже при расширении ее динамического и спектрального диапазона до ультрафиолетовой и инфракрасной областей, не в состоянии. В результате возникает опасность одностороннего анализа и односторонней интерпретации физиолого-биохимических/биофизических данных, детерминированных дефицитом источников исходной информации.

Отклоняясь от темы, следует отметить, что особенно страдают униmodalностью и, как следствие, низкой репрезентативностью отечественные и постсоветские работы по новым методам ауксанометрии. Несмотря на появление первых русскоязычных статей по электронной ауксанометрии в XXI в. [8], они еще весьма далеко отстоят от европейских и североамериканских разработок начала 90-х гг. XX в. Не помогают при этом и модернизация или реконструкция ранних ауксанометрических аппаратов (например, ауксанометр КТП Лаборатории экспериментальной ботаники Новгородского университета), поскольку физические принципы измерения остаются прежними и часто изменяется только форма регистрации без конструктивной переработки и внедрения в его конструкцию новых датчиков. Даже о банальном соединении принципов цейттраферной съемки с анализом кинетики и механизмов сигнализации и с применением впоследствии методов молекулярной биологии (что характерно для зарубежных работ того же периода [16]) речь в отечественных публикациях не идет. Фактически размыта граница между учебными ауксанометрами, достаточными для студенческого практикума или школьной практики в классе с биологическим уклоном, и серьезными аналитическими установками, причем уклон имеет место в сторону упрощения исследовательской техники, а не синтеза новых прогрессивных конструкций, внедряемых в вузы и школы, на базе прецизионной аналитической техники. Иными словами, как писалось в первой половине XX в. об одной из основательниц общедоступной экспериментальной ботаники Лилиан Кларк [33], "a time when science was still the Cinderella of the curriculum" (т.е., дословно: «время, когда наука являлась Золушкой образования») [143]. Эта ситуация требует категориального изменения. В противном случае неизбежно появление упрощенных, неполных по репрезентативности характеристических критериев моделей в статьях, апеллирующих к ауксанометрии как к верификационным данным [4].

Принципы нового ауксанометрического подхода

Из изложенного выше материала следует, что требуется разработка технологии или, корректнее, новой идеологии ауксанометрии, позволяющей объединить физиологический мониторинг, анализ наиболее характеристических

биохимических данных, получаемых в ходе неразрушающего контроля (т. е. не препятствующих проведению эксперимента), измерения роста с временным разрешением и длительностью, достаточной для проведения фенологической периодизации и анализа стадийности развития растений. Переход от анализа роста (ауксанометрии) к анализу развития должен производиться при учете фенофаз, свойственных тем или иным породам, а в масштабах лесных сообществ и их лабораторных моделей, создаваемых в климатических камерах с учетом естественных метеоролого-климатических условий имитируемой местности, сопровождаться синтезом феноспектров, взаимно однозначно коррелирующих с биохимической спектроскопией/спектрометрией, регистрируемой с временным разрешением в соответствии с указанным выше комплексным подходом. Это очевидно, так как феноспектр, демонстрирующий, по Сукачеву и Гаме, переходы между фенофазами и стадии вегетации, цветения и т. д. вплоть до листопада, однозначно соответствует физиолого-биохимическим изменениям растения на этих стадиях, которые могут быть проанализированы вышеозначенным путем. Так как феноспектры древесных пород распространены в лесных хозяйствах СНГ и постсоветской России (там, где они еще сохранились), сделать дополнительно географическую привязку этих данных с геоботаническим картированием также не представляет серьезного труда.

Рассмотрим детально возможности предлагаемой феноспектральной ауксанометрии. Общеизвестно, что основными фенофазами растений считаются сокодвижение, появление листы, цветение, плодоношение и листопад. Очевидно, что сокодвижение сопровождается изменением интенсивности транспирации и гидродинамических коэффициентов восходящего и нисходящего тока; появление листы сопровождается фотосинтетической эмиссией кислорода и изменением эффективности транспирации вследствие увеличения функциональной удельной поверхности; цветение сопровождается эмиссией характерных с точки зрения химического анализа молекул ароматических структур, зависящих от фазы эмиссии, т. е. от времени взятия пробы; эта эмиссионная характеристика изменяется в переходе к плодоношению (хотя первые ароматические профили можно регистрировать и на стадии появления листы); листопад сопровождается эмиссией продуктов разложения листы и пигментного распада и т.д. Все продукты и аддукты физиологической эмиссии химически определимы с использованием неразрушающих по отношению к растению – эмиттеру методов атмосферного спектрального анализа и газовой хроматографии среды.

Рассмотрим, что можно зарегистрировать с использованием газовой хроматографии и интерпретировать как характеристические детерминанты тех или иных стадий развития растений и модельных растительных сообществ.

Во-первых, речь, вполне очевидно, идет о газах. С точки зрения физиологической экологии лесных растений [85], представляющей собой кооперативное расширение общей физиологии лесных растений [86], эмиссия кислорода не является единственным «газохимическим» критерием для фитосообщества, так как следует учитывать экологические обратные связи, детерминирующие физиологию эмиссионного массива в целом. Так, в частности, сравнительно недавно было обнаружено, что растения различных климатических зон

способны к метаногенезу [78], после чего во многих странах (в том числе и в России [5, 6]) развернулись исследования форм метаногенной активности древесных растений. Стало известно также, что растения способны к эмиссии NO в количествах, достаточных для измерения методами газовой хроматографии (GC) и газовой хромато-масс-спектрометрии (GC-MS) [7]. Кроме того, следует учитывать связи почва–лес в анализе газовой эмиссии, так как увеличение концентрации углекислого газа, понижающее регулирующий эффект растительности, влечет увеличение эмиссии других парниковых газов (закиси азота и метана) из почвы [38, 81, 141], причем неблагоприятные по отношению к растениям климатические факторы стимулируют их собственную эмиссию парниковых газов [121]. В отличие от некоторых представителей фитопланктона [68], для которых увеличение концентрации углекислого газа влечет увеличение продуктивности, для лесных массивов этот принцип не действует, поэтому необходимо строго относиться к выявлению корректных обратных связей в физиолого-экологических процессах в лесном сообществе (для чего, в частности, можно использовать предлагаемый феноспектральный подход).

Во-вторых, речь идет о мониторинге транспирации. Это отчасти коррелирует с газодинамическим мониторингом, так как климатическая конвекция, регулирующая фазы осцилляций содержания углекислоты в атмосфере, регулирует также и температуру масс воздуха, что воздействует на испарение/транспирацию растений, с позиций гидравлики листа [14, 21, 103]. Элементный состав выделяемого при транспирации исследуется методами хроматографии как в случае транспирационных потоков на поверхности, так и в случае транспирации корней в конденсированной среде [95, 96, 101, 108]. Идеализация при решении соответствующей модельной задачи *in vitro* в герметизированных условиях может быть в терминологии зарубежной газовой хроматографии означена как отношение между *sample phase* и *headspace* (*gas phase*), где роль *headspace* выполняет атмосфера или экспериментальная среда климатической камеры, а *sample phase* – жидкостная поверхность транспирации (по аналогии с [83]). Поэтому, если создать герметичную климатическую камеру с подведенными каналами газового хроматографа и соответствующей ей системой забора газовых проб, то можно осуществить аналог «static headspace – gas chromatography» с временным разрешением в нативной среде. Это позволит одновременно анализировать транспирацию и изменения газового состава стандартизированной климатической среды, делая выводы об основных обменных процессах между биомассой растений и модельной окружающей средой с точки зрения физиологической экологии лесных насаждений [85].

В-третьих, газовая хроматография*, включая GC-MS и вышеуказанный Headspace Method, может быть использована для анализа и идентификации

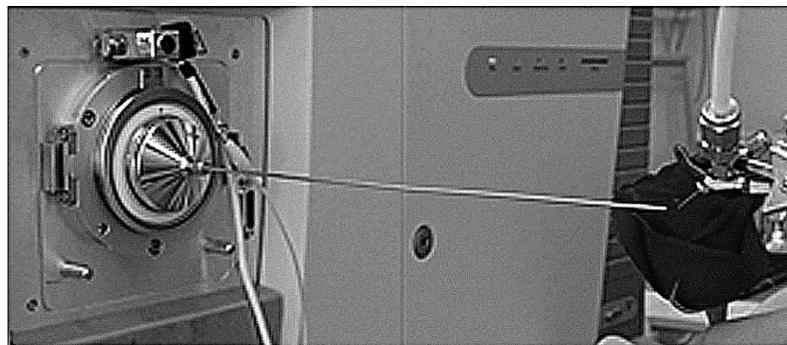
* Это целесообразно осуществлять с использованием сорбционных трубок для сбора летучих органических веществ и термодесорбера при отборе ячейкой FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) или, что логично в случае лабораторной прогонки метода, любыми методами с подачей из климатической камеры.

по компьютерным базам данных запахов, источаемых лесными растениями [64, 72, 146]. Как известно, лесные деревья и ярусные растения, входящие в поддерживающие их фитосообщества, производят эмиссию характерных ароматических веществ в достаточных для органолептического определения количествах как на стадии цветения, так и на стадии плодоношения [48, 60, 140]. Помимо их, деревья зачастую выделяют фитонциды [92], стандартно определяемые методами газовой хроматографии [3]. Фитонцидная активность эмиссии максимальна во время световой фазы фотосинтеза, минимальна ночью – во время темновой фазы, причем интенсивность генерации фитонцидов корреляционно связана с интенсивностью дыхания, температурой воздуха и др. При этом, что характерно для предлагаемого метода в лесной практике, высшая активирующая деятельность фитонцидов свойственна лесам, а не городским насаждениям [93, 94]. При определении летучих органических веществ в климатических камерах можно применять достаточно крупные по объемным характеристикам боксы, так как радиус действия тех же фитонцидов составляет 3...5 м (по ингибированию микроорганизмов в микробиотестерах). Современные методы анализа и биопроессинга запахов [49, 50] позволяют определять достаточно тонкие композиции не в словарно-дефинитивном [39], а в точном аналитическом смысле, так как развитие технологий автоматического количественного определения запахов [147] (в частности, постоянно совершенствуемых и уже внедренных в практику в ряде зарубежных организаций технологий типа «electronic nose» [40, 73, 117, 126]) дает возможность не апеллировать к человеческому восприятию при классификации ароматов, определяемых машинным путем. Необходимость анализа запахов в фенологическом виде можно объяснить тем, что микроклиматические и фенологические факторы воздействуют на химический состав их носителей [88], семиохимические характеристики растительных сигналов к насекомым-опылителям и функционально-обратных химически-отпугивающих факторов меняются в зависимости от времени [128], палинологические паттерны сезонов цветения у разных видов растений различны в зависимости от климатических факторов и географических параметров, определяющих фенологию данного вида или сообщества, а следовательно, и их одорологические характеристики меняются синхронно или же коррелятивно к первым [120]. Таким образом, машинный (т. е. не субъективный одорологический, а корректный флейвохимический – хроматографический) анализ источников запаха растений неизбежен. Поскольку в исследовании эмиссии летучих соединений с лиственной поверхности часто применяют газовую хромато-масс-спектрометрию [51], можно не ограничивать детектирование обычной газовой хроматографией*, а ставить на выходе

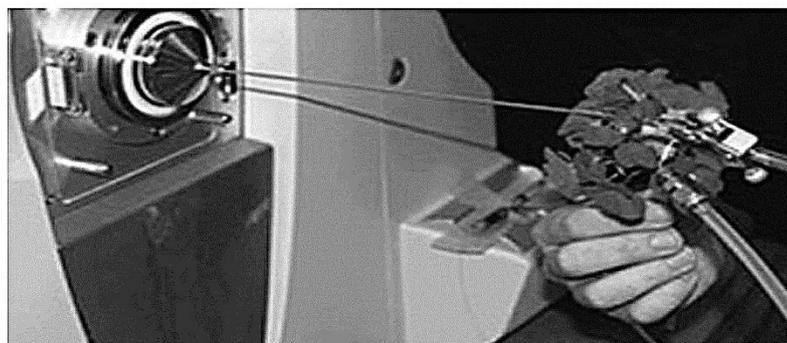
* Газово-биохимические исследования, несмотря на очевидное отнесение большинства биохимических агентов к частично упорядоченным, жидким и конденсированным средам, не должны рассматриваться в данном методе как экзотика, поскольку еще в 80-е гг. XX в. за рубежом проводились работы газово-биохимической направленности и конференции по различным подобластям этой направленности (например, газовой энзимологии [53]).

вышеуказанной хромато-ауксанометрической установки масс-спектрометр, переходя тем самым от метода хромато-ауксанометрии к хромато-масс-ауксанометрии.

В настоящее время уже существуют проекты «флейвохимического носа» для анализа цветочных запахов при атмосферном давлении на основе DE-SI-MS (десорбционный электроспрей или, что эквивалентно, десорбционная ионизация распылением в электрическом поле) в рамках подходов DART (Direct Analysis in Real Time – прямого анализа в режиме реального времени). Пример использования подобной системы для флейвохимического различения приведен на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Десорбционная ионизация распылением в электрическом поле как способ анализа в режиме реального времени для исследования и химической систематизации цветения разных видов цветковых растений: *а* – <http://www.sciencedaily.com/>; *б* – <http://news.sciencemag.org/>; (разработчик метода З. Такац)

Так как фенология форм растений зависит от потоков углерода, влажности сред, суточного температурного диапазона и поверхностного энергетического баланса [61], необходимо сопоставлять в базах данных управляющего программного обеспечения установки данные хроматографии или хромато-

масс-спектрометрии данным измерений параметров внешних сред, при которых производилось измерение в каждый момент времени мониторинга. Надо отметить, что частично на многие из этих параметров будет воздействовать и микрофауна, так как газообмен в фотосинтезе [54] противен газообмену в респирации микрофауны [100], что сказывается и на уровне их взаимодействия в рамках физиологической экологии [85]. Необходимо либо предусмотреть отсутствие микрофауны (беспозвоночных) в почве и на растениях в форме карантина проростков или саженцев на стадии их подготовки к экспериментальной работе/мониторингу, либо найти способы их эколого-физиологического учета в математической модели, описывающей воздействие их молекулярной эмиссии на равновесие системы с учетом множественных обратных связей [131]. Вышеуказанные примеры абиотических и биотических факторов, способных вносить искажения в процесс наблюдения за описанной локализованной моделью лесоразведения, приводятся в целях демонстрации аэрохимической комплексности системы, следствием которой неизбежно является необходимость внедрения дополнительных способов анализа и сбора данных.

Как правило, в компьютерной идентификации органических соединений используют не одну методику, а комплекс методов, определяющих и количественные, и качественные особенности исследуемого анализа с позиций различных молекулярных дескрипторов [139] в соответствии с измеримыми аппаратными методами характеристиками. В отечественной практике рекомендуется не ограничиваться спектроскопическими методами, а применять также хроматографию и масс-спектрометрию при компьютерной идентификации по базам данных [1]. Поскольку в случае предлагаемой идеологии разработки/программирования установки система будет подавать сигналы в режиме реального времени, регулироваться и допускать определение комплексной параметрики через диагностику своего внутреннего состояния по всем источникам сигнала, речь идет, в сущности, о разработке экспертной химической системы [63] с функцией мультисенсорного синтеза потоков данных [59, 106, 124] и комплексной идентификации, соответствующей сбору сигналов с множества источников. Так как издавна с ауксанометрами (начиная с 30-х гг. XX в.), гибридовали монохроматоры и спектрографы-монохроматоры* [15], логично использование в качестве дополнения к газовому хроматографу, как минимум, оптического спектрального анализа (что соответствует [90]). Так как с позиций нелинейной физики экосистем [104], динамика экстремумов спектров во времени вегетации и при переходах от состояния к состоянию при чередовании фаз будет иметь нелинейный характер, соответствующий биофизической кинетике указанного процесса, а в большинстве самосогласованных моделей лесной динамики [18, 26, 119] имеется нелинейность и соответствующие ей обратные связи, очевидно, что идентификационные свойства эксперименталь-

*Это можно связать также с методами лазерной ауксиметрии при использовании монохроматического (по определению) лазерного излучения [22, 23].

ного объема как динамической системы [70] интерпретируемы как параметры комплексной системной динамики [55] для нелинейной идентификации [112] процессов в комплексных сетях [12], каковыми являются экологические системы с позиций синтеза мультисенсорной информации (в частности, в системах дистанционного зондирования [90]). С позиций ММА-подхода (Mixed Methods Approaches – гибридизация отличных методов в целях верификации и установления фальсифицируемости каждого из них и общего массива данных, полученных с их помощью) [35] только сравнение данных газовой хроматографии, оптической спектроскопии и климатического мониторинга может дать достаточно качественную и однозначную картину процессов, идущих в установке на различных уровнях энд(о)экологической и экзэкологической связности в ней, вследствие чего невозможно ставить вопрос об систематической идентификации и фингерпринтинге индивидуальных видовых фенофаз без обеспечения контролируемых условий среды. Так как в той же газовой хроматографии для решения таких сложных, неразрешимых в рамках обычных методических подходов, проблем используют программное обеспечение для хемометрики со сложным математическим анализом [36] (многомерные методы – Multivariate Methods), причем многомерная хемометрика может быть соотнесена с методами определения структурных корреляций отдельных биохимических свойств [99] в рамках подхода QSAR (Quantitative Structure Activity Relationships), это актуально для идеологии конструирования настоящего типа установок, так как методы QSAR широко используются при моделировании отклика окружающей среды на внешние воздействия [113], причем давно созданы компьютерные методы подбора отклика по физическим свойствам молекулярных агентов [24]. Подход такого рода верен и в обратных задачах, вследствие чего можно использовать его и в ходе моделирования при мониторинге молекулярной эмиссии лесных растений и их сообществ (например, в описываемой установке или установках типа БИОТРОН, ФИТОТРОН с системой сбора, адекватной описываемой для настоящей установки)*. Обычно мультимодальные и мультипараметрические системы сбора дистанционной информации используются только в гибридизации с географическими информационными системами (GIS) для глобального мониторинга [127], однако для фитофизиологической прогонки лесных систем возможно отчасти заменить аппроксимацию глобальной динамики (с интерполяцией на достаточно локальные области) фитотронной прогонкой с мультипараметрической

*Надо отметить, что QSAR плотно вошел в практику автоматизированной интерпретации данных газовой хроматографии ароматических соединений [41, 76] и соединений, входящих в ароматические композиции растений [42, 138], поэтому использование QSAR-подхода во флейвохимическом фингерпринтинге лесных экосистем и их моделей в описываемой установке имеет веские основания к применению. В то же время, в теоретической химии существуют работы по квантово-химическим дескрипторам в GLPC [65], что дает возможность для простых газов, применяемых в фотосинтезе и дыхании, также использовать идеи QSASR.

регистрацией при варьировании экспериментальных условий среды в установках/аппаратах, конструктивно подобных предлагаемым в настоящей работе (вплоть до апробации зимней регистрации витальных параметров при морозостойкой выгонке лесных пород [144]) в моделирующем соответствующие географические области искусственном микроклимате, индуцирующем соответствующие ему количественно-определимые физиологические реакции [74]*.

В мультипараметрических системах дистанционного зондирования, как правило, для детектирования растительности используют принципы гиперспектрального картирования [66, 67] и лидарные методы, в частности, с использованием лазерной лидарной техники [62] (не считая ресурсоемких методов, требующих использования интерференционно-поляриметрической техники [89]), поэтому использование монохроматоров или лазерной техники сканирующего считывания в хромато-ауксиметрических установках для полной репрезентативности к GIS-прототипу логично совмещать со спектральным картированием поверхности растений. Эта задача не является избыточной, так как известно, что в разных условиях среды спектрально-рефлектометрические характеристики могут иметь градиент даже у одного растения, что может быть обусловлено различной доступностью излучения фотосинтетического диапазона листу и коррелирующим с этим изменением пигментной концентрации [56], изменением пигментного состава листа при биогенезе пластид в ходе перехода от пропластид к зрелым и, в дальнейшем, геронтопластам [17], стрессом листа [107] (который, как указывалось ранее, приводит и к изменению молекулярной эмиссии газов растением), изменением содержания воды и соотношения воды и окисляемых форм в составе растения [37], градиентом содержания хлорофилла [30], различием стадийных форм растения и соответствующей этим формам дефинитивной структурой листа [130] до его некральных изменений [118], сопровождающихся молекулярной газовой эмиссией в той мере, которая позволяет сопоставить отражательным спектрам листа хроматограммы или масс-спектры выделений, зарегистрированных «в линию» одновременно со спектрами отражения по многоканальной системе. Спектральное картирование можно производить в поточном порядке в режиме реального времени с использованием цифровых охлаждаемых (в идеальном случае, но не обязательно) камер и дальнейшей математической обработки при параллельной классификации результатов на мэйнфреймах [28, 29] с последующей 3D-визуализацией [79].

* Это может быть особенно применимо для моделирования лесного хозяйства РФ, так как в соответствии с климатической классификацией по Кёппену [84, 116] большая часть РФ относится к зонам субарктической принадлежности Dw и Df с преобладанием Dfc и Dfd, где индекс «с» означает минорный температурный диапазон от -25 до -10 °C, а индекс «d» – от -40 до -25 °C (в ряде нотаций читающийся как «мучительно холодно»).

При использовании многопроцессорных/многоядерных машин для обсчета данных ауксанометрической установки с гибридизацией физических принципов измерений можно использовать пакет STATA/MP, так как он допускает не только обработку рядов динамики (временных рядов) [13], получаемых с установки, но и определение степени их правдоподобности [58], многомерное моделирование, соответствующее многофакторной стратегии сбора данных [122, 123], а также выявление причинно-следственных связей при использовании структурных уравнений [9], не считая обычного регрессионного анализа [82]. Таким образом, к задачам распознавания образов спектров [129] (в частности, ИР-спектров [148], так как допустима мультиспектральная/гиперспектральная съемка в ИК-диапазоне [142], способная демонстрировать тепловые свойства листвы в климатической камере), решаемым программным путем в рамках интерпретации данных спектрального мониторинга как паттернов, характеристических с точки зрения биоинформатики [115], в случае гиперспектральной фотографической регистрации добавляются задачи multispectral pattern recognition [110] во всех спектральных диапазонах в духе техники ISODATA [10], причем в динамике к ним еще прибавляется новый уровень спектральных данных – продукт оконной спектральной обработки вариаций параметров фитофизиологии во временных циклах, обусловленных циркадными и фенологическими ритмами [134]. В таком случае к обычным оптическим и прочим данным, получаемым в ходе дистанционного зондирования растительности в рамках стандартных физических принципов, реализуемых при невозможности фиксирования движущегося детектора на отдельных элементах флоры во время мониторинга [75], при стационарном расположении детекторов в ауксанометре прибавляется возможность анализа фенологической или феноспектральной динамики этих факторов и индикаторов физиологического отклика (к которой, собственно, и применяют методы нелинейного экологического анализа [134], в том числе в рамках физиологической экологии древесных растений [85]). Таким образом, гибридизация оптической, хроматографической и мультиспектральной фотографической информации требует весьма больших вычислительных ресурсов на выходе установки, однако результаты полновесной компьютерной обработки подобного рода полностью оправдываются предсказательными свойствами формируемой модели, способной быть использованной в ходе лесоразведения в прагматических целях. Иными словами, вместо ауксанометрии как мониторинга прошедших коэффициентов роста (определимых также через конформные преобразования [2] морфометрическим путем) саженца/сеянца лесной породы таким образом получаем качественную идентификацию фаз развития и многопараметрическую эквивалент-модель, обладающую предсказательной силой (на ограниченном временном промежутке), в том числе и для программируемых изменений параметризуемых свойств окружающей среды.

Выводы

1. Предложенная инновационная ауксанометрическая система, позволяющая наблюдать за первичным ростом лесных пород в контексте развития

за счет того, что индикатором динамики является не количественный (как в обычной ауксанометрии, где единственным критерием роста является удлинение проростка), а комплексно-качественный критерий, складывающийся из взаимно-однозначного сопоставления результатов аналитико-химического анализа молекулярной эмиссии растений и вариаций характеристик среды, что позволяет анализировать обратные связи роста/развития растения и деформаций параметрики внешней среды.

2. В ходе работы в различных режимах посредством обучения распознаванию образов с пополнением базы данных она позволяет исследовать и моделировать не только один паттерн развития растения, свойственный некоторому стандартному пространству признаков, но и исследовать экспериментальный отклик экологической структуры признаков на изменение параметров среды, т. е. переходить к фенологическому, модельно-биогеографическому, биометеорологическому, биоклиматологическому, эколого-физиологическому подходам по мере исследовательской необходимости (если таковые позволяют параметры биотрона, климатической камеры, оранжереи, в которых производится выгонка проростков лесных пород), заноса спектральные и хроматографические данные в виде корреляционных паттернов в базы данных для последующего сличения.

3. При феноспектральной экспериментальной выгонке модель позволяет программировать и с помощью обратной связи регулировать температуру, четко прогнозируя начало вегетации посредством суммирования эффективных температур или выявления их тренда, позволяющего реконструировать последовательность всхода или вегетации отдельных растительных форм в корреляции с характеристическими параметрами искусственного климата.

4. Автоматически классифицирует по комплексу характеристик на феноритмотипы или фенологические группы древесные растения в модельных фитосообществах по более шкалированной градации, чем в устаревшей системе Морозовой, выделявшей только два феноритмотипа у древесных растений (вечнозеленые и листопадные).

5. Позволяет работать в режиме регуляции параметрики климатической камеры путем регистрации обратной связи растений за счет использования детекторов и датчиков их молекулярной эмиссии в контролируемом физическом окружении, т. е. сами параметры, регистрируемые детектирующей частью установки могут представлять собой сигнал для изменения режима ее функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вершинин В.И., Дерендяев Б.Г., Лебедев К.С.* Компьютерная идентификация органических соединений. М.: Академкнига, 2002. 197 с.
2. *Градов О.В., Нотченко А.В.* Полуавтоматическая дендрохронография для исследования морфогенеза и тератоморфозов на спилах высших растений // Лесотехн. журн. 2012. № 4(8). С. 47–57.

3. *Дмитриев М.Т., Мицихин В.А., Степанов Е.В.* Газохроматографическое определение фитонцидов в воздухе. Гигиена и санитария, М.: Медицина, 1983. № 7. С. 43–45.
4. *Михайленко И.М.* Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных // Сельскохозяйственная биология. 2007. № 1. С. 103–111.
5. *Мухин В.А., Воронин П.Ю.* Метаногенная активность в древесных растениях // Физиология растений, 2009. Т. 56. С. 152–154.
6. *Мухин В.А., Воронин П.Ю.* Выделение метана из древесины живых деревьев // Физиология растений, 2011. Т. 58, № 2. С. 283–289.
7. *Полесская О.Г.* Растительная клетка и активные формы кислорода. М.: Университет, 2007. 140 с.
8. *Рассадина В.А., Яронская Е.Б., Вершиловская И.В., Егоров В.М., Аверина Н.Г.* Электронная ауксанометрия – новый способ регистрации ростовых реакций растений // Земляробства і ахова раслін: навукова-практычны часопіс. 2007. № 2. С. 19–20.
9. *Acock A.C.* Discovering Structural Equation Modeling Using Stata. Stata Press, College Station, Texas, 2013. 304 p.
10. *Ball G.H., Hall D.J.* Isodata: a method of data analysis and pattern classification, Stanford Research Institute. Office of Naval Research. Information Sciences Branch, Menlo Park, California, 1965. 79 p.
11. *Barnes C.R.* A Registering Auxanometer // Botanical Gazette. 1887. Vol. 12, No 7. P. 150–152.
12. *Barrat A., Barthélemy M., Vespignani A.* Dynamical Processes on Complex Networks. Cambridge University Press, 2012. 361 p.
13. *Beckett S.* Introduction to Time Series using Stata. Stata Press, College Station, Texas, 2013. 741 p.
14. *Beerling D.J., Franks P.J.* Plant science: The hidden cost of transpiration // Nature. 2010. Vol. 464. P. 495–496.
15. *Bergann F.* Untersuchungen über Lichtwachstum, Lichtkrümmung und Lichtabfall bei *Avena sativa* mit Hilfe monochromatischen Lichtes // Planta. 1930. Vol. 10, No 4. P. 666–743.
16. *Binder B.M.* Rapid Kinetic Analysis of Ethylene Growth Responses in Seedlings: New Insights into Ethylene Signal Transduction // Journal of Plant Growth Regulation. 2007. Vol. 26, No 2. P. 131–142.
17. *Biswal U.C., Biswal B., Raval M.K.* Chloroplast Biogenesis: From Proplastid to Gerontoplast. Kluwer Academic, Dordrecht–Boston–London, 2003. 380 p.
18. *Botkin D.B.* Forest Dynamics: An Ecological Model. Oxford University Press. Oxford–New York, 1993. 328 p.
19. *Bovie W.T.* A Precision Auxanometer // Botanical Gazette. 1912. Vol. 53, No 6. P. 504–509.
20. *Bovie W.T.* A Simplified Precision Auxanometer // American Journal of Botany. 1915. Vol. 2, No 2. P. 95–99.
21. *Brodribb T.J., Feild T.S.* Leaf hydraulic evolution led a surge in leaf photosynthetic capacity during early angiosperm diversification // Ecology Letters. 2010. Vol. 13. P. 175–183.
22. *Budagovskaya N.V., Guliaev V.I.* Effect of calcium channel blocker on the growth dynamics of plants studied by laser interference auxanometry // Developments in Plant and Soil Sciences. 2002. Vol. 92. P. 204–205.

23. *Budagovskaya N.V., Guliaev V.I.* Rapid and Slow Response Reactions of Plants on Effect of Antioxidant Ambiol. In: *Advanced Research on Plant Lipids (Proceedings of the 15th International Symposium on Plant Lipids)*. Springer, Dordrecht, 2003. P. 323–326.
24. *Bumble S.* Computer Generated Physical Properties. CRC Press, Boca Raton, 1999. 288 p.
25. *Bumpus H.C.* A Simple and Inexpensive Self-Registering Auxanometer // *Botanical Gazette*. 1887. Vol. 12, No 7. P. 149–150.
26. *Buonigiorno J., Zhu S., Zhang D., Turner J., Tomberlin D.* The Global Forest Products Model: Structure, Estimation, and Applications. Academic Press, Amsterdam–Boston–London–New York–Oxford–Paris–San Diego–San Francisco–Singapore–Sydney–Tokyo, 2003. 300 p.
27. *Burgerstein A.* Das pflanzenphysiologische Institut der K.K. Wiener Universität von 1873–1884 // *Österreichische botanische Zeitschrift*. 1884. Vol. 34, No 12. P. 418–422.
28. *Chang C.-I.* Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis. Wiley, Hoboken, 2013. 1164 p.
29. *Chang C.-I.* Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification. Kluwer Academic - Plenum Publishers, New York, 2003. 367 p.
30. *Chen J.-C., Chen C.-T.* Correlation Analysis Between Indices of Tree Leaf Spectral Reflectance and Chlorophyll Content // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII, Part B7. 2008. P. 231–238.
31. *Cholodny N.* Über das Wachstum des vertikal und horizontal orientierten Stengels in Zusammenhang mit der Frage nach der hormonalen Natur der Tropismen // *Planta*. 1929. Vol. 7, No 5. P. 702–719.
32. *Christian M., Lüthen H.* New methods to analyze auxin-induced growth I: Classical auxinology goes *Arabidopsis* // *Plant Growth Regulation*. 2000. Vol. 32, No 2-3. P. 107–114.
33. *Clarke L.J.* Botany As An Experimental Science – In *Laboratory And Garden*. Oxford University Press, Milton, 1935. 138 p.
34. *Claussen M., Lüthe H., Blatt M., Böttger M.* Auxin-induced growth and its linkage to potassium channels // *Planta*. 1997. Vol. 201, No 2. P. 227–234.
35. *Creswell J.W.* Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. SAGE Publications Inc., Los Angeles–London–New Delhi–Singapore–Washington, 2013. 304 p.
36. *Cserhati T.* Multivariate Methods in Chromatography: A Practical Guide. Wiley, Hoboken – Chichester, 2008. 352 p.
37. *Dasgupta S.* Remote Sensing of Vegetation Water and Fire Risk: Selected Research Topics. VDM, Saarbrücken, 2009. 176 p.
38. *Davidson E.A., Keller M., Erickson H.E., Verchot L.V., Veldkamp E.* Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides // *BioScience*. 2000. Vol. 50. P. 667–680.
39. *De Rovira D.* Dictionary of Flavors. Wiley-Blackwell, Ames, Iowa, 2004. 736 p.
40. *Degenhardt D.C., Greene J.K., Khalilian A.* Temporal Dynamics and Electronic Nose Detection of Stink Bug-Induced Volatile Emissions from Cotton Bolls // *Psyche*. 2012. Vol. 2012. ID 236762. P. 1–9.
41. *Drosos J.C., Viola-Rhenals M., Vivas-Reyes R.* Quantitative structure-retention relationships of polycyclic aromatic hydrocarbons gas-chromatographic retention indices // *J. Chromatogr. A*. 2010. Vol. 1217, No 26. P. 4411–4421.

42. Du H., Wang J., Hu Z., Yao X. Quantitative Structure Retention relationship study of the constituents of saffron aroma in SPME-GC-MS based on the projection pursuit regression method // *Talanta*. 2008. Vol. 77, No 1. P. 360–365.
43. Engel H., Heimann M. Weitere Untersuchungen über periodische Guttation // *Planta*. 1949. Vol. 37, No 3. P. 437–450.
44. Evans M.L., Mulkey T.J., Vesper M.J. Auxin action on proton influx in corn roots and its correlation with growth // *Planta*. 1980. Vol. 148, No 5. P. 510–512.
45. Evans M.L., Ishikawa H., Estelle M.A. Responses of *Arabidopsis* roots to auxin studied with high temporal resolution: Comparison of wild type and auxin-response mutants // *Planta*. 1994. Vol. 194, No 2. P. 215–222.
46. Evans M.L. Functions of Hormones at the Cellular Level of Organization // *Encyclopedia of Plant Physiology*. 1984. Vol. 10. P. 23–79.
47. Fernandez S.R., Wagner E. A New Method of Measurement and Analysis of the Stem Extension Growth Rate to Demonstrate Complete Synchronization of *Chenopodium rubrum* Plants by Environmental Conditions // *Journal of Plant Physiology*. 1994. Vol. 144, No 3. P. 362–369.
48. Flavor and Health Benefits of Small Fruits (ACS Symposium Series). Ed. by M. Qian, A. Rimando. American Chemical Society, Washington, 2010. 336 p.
49. Flavor, Fragrance, and Odor Analysis. Ed. by R. Marsili. CRC Press, Boca Raton, 2011. 280 p.
50. Flavours and Fragrances: Chemistry, Bioprocessing and Sustainability. Ed. by R.G. Berger. Springer, Berlin–Heidelberg–New York, 2007. 664 p.
51. Fredrickson E.L., Estell R.E., Remmenga M.D. Volatile compounds on the leaf surface of intact and regrowth tarbush (*Flourensia cernua* DC) canopies // *J. Chem. Ecol.* 2007. Vol. 33, No 10. P. 1867–1875.
52. Fritsch K. Akademien, Botanische Gesellschaften, Vereine, Kongresse etc. // *Österreichische botanische Zeitschrift*. 1905. Vol. 55, No 6. P. 245–251.
53. Gas Enzymology. Ed. by H. Degn, R.P. Cox, H. Toftlund. Proceedings of a Symposium held at Odense University, Denmark, 1984. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, 1985. 264 p.
54. Geider R. Algal Photosynthesis: The Measurement of Algal Gas Exchange. Springer, 1992. 256 p.
55. Giantomassi A. Modeling estimation and identification of complex system dynamics: issues and solutions. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2012. 136 p.
56. Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M.N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // *Journ. Plant Physiol.* 2003. Vol. 160. P. 271–282.
57. Golden K.E. An Auxanometer for the Registration of Growth of Stems in Thickness // *Botanical Gazette*. 1894. Vol. 19, No 3. P. 113–116.
58. Gould W., Pitblado J., Poi B. Maximum Likelihood Estimation with Stata. Stata Press, College Station, Texas, 2010. 352 p.
59. Hall D.L., McMullen S.A.H. Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion. Artech House, Boston–London, 2004. 466 p.
60. Handbook of Fruit and Vegetable Flavors. Ed. by Y.H. Hui. Wiley, Hoboken, 2010. 1095 p.
61. Hanes J.M. Spring leaf phenology and the diurnal temperature range in a temperate maple forest // *International Journal of Biometeorology*. 2013. Vol. 58, No 2. P. 103–108.
62. Helt M.F. Vegetation Identification With LIDAR. Thes. Naval Postgraduate School. Monterey, California, 2005. 83 p.

63. Hemmer M.C. Expert Systems in Chemistry Research. CRC Press, Boca Raton, 2007. 416 p.
64. Heydanek M.G., McGorin R.J. Gas chromatography-mass spectroscopy investigations on the flavor chemistry of oat groats // J. Agric. Food Chem. 1981. Vol. 29, No 5. P. 950–954.
65. Hoffmann E.A., Fekete Z.A., Rajkó R., Pálinkó I., Körtvélyesi T. Theoretical characterization of gas-liquid chromatographic stationary phases with quantum chemical descriptors // Journ. Chromatogr. A. 2009. Vol. 1216, No 12. P. 2540–2547.
66. Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Sub-Tropical Forests. Ed. by M. Kalacska, G.A. Sanchez-Azofeifa. CRC Press, Boca Raton - London - New York, 2008. 352 p.
67. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. Ed. by P.S. Thenkabail, J.G. Lyon, A. Huete. CRC Press, Boca Raton, 2011. 781 p.
68. Iglesias-Rodriguez M.D., Halloran P., Rickaby R.E.M., Hall I.R., Colmenero-Hidalgo E., Gittins J.R., Green D.R.H., Tyrrell T., Gibbs S.J., Dasso P., Rehm E., Armbrust E.V., Boessenkool K.P. Phytoplankton Calcification in a High-CO₂ World // Science. 2008. Vol. 320. P. 336–340.
69. Inman-Bamber N.G. Automatic plant extension measurement in sugarcane in relation to temperature and soil moisture // Field Crops Research. 1995. Vol. 42, No 2-3. P. 135–142.
70. Isermann R., Münchhof M. Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications. Springer, Heidelberg–Dordrecht–London–New York, 2011. 730 p.
71. Jaffe M.J. Thigmomorphogenesis: The response of plant growth and development to mechanical stimulation // Planta. 1973. Vol. 114, No 2. P. 143–157.
72. Jennings W. Qualitative Analysis of Flavor and Fragrance Volatiles by Glass Capillary Gas Chromatography. Academic Press, New York–London–Sydney–Toronto–San Francisco, 1980. 472 p.
73. Jin H.J., Lee S.H., Kim T.H., Park J., Song H.S., Park T.H., Hong S. Nanovesicle-based bioelectronic nose platform mimicking human olfactory signal transduction // Biosensors and Bioelectronics, 2012. Vol. 35, No 1. P. 335–341.
74. Jones H.G. Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology. Cambridge University Press, Cambridge–New York–Melbourne, 1992. 456 p.
75. Jones H.G., Vaughan R.A. Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications. Oxford University Press, Oxford–New York, 2010. 400 p.
76. Jönsson S., Eriksson L.A., van Bavel B. Multivariate characterization and quantitative structure-property relationship modeling of nitroaromatic compounds // Anal. Chim. Acta. 2008. Vol. 621, No 2. P. 155–162.
77. Katou K., Ichino K. Effects of carbon dioxide on the spatially separate electrogenic ion pumps and the growth rate in the hypocotyl of *Vigna sesquipedalis* // Planta. 1982. Vol. 155, No 6. P. 486–492.
78. Keppler F., Hamilton J.T., Brass M., Rockmann T. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions // Nature. 2006. Vol. 439. P. 187–191.
79. Kim K.S. 3D Visualization of an Invariant Display Strategy for Hyperspectral Imagery. Thes. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002. 67 p.
80. Kim S.Y., Mulkey T.J. Effect of ethylene antagonists on auxin-induced inhibition of intact primary root elongation in maize (*Zeamays L.*) // Journal of Plant Biology. 1997. Vol. 40, No 4. P. 256–260.
81. Knohl A., Veldkamp E. Global change: Indirect feedbacks to rising CO₂ // Nature. 2011. Vol. 475. P. 177–178.
82. Kohler U., Kreuter F. Data Analysis Using Stata. Stata Press, College Station, Texas, 2012. 497 p.

83. Kolb B., Ettre L.S. Static Headspace-Gas Chromatography: Theory and Practice. Wiley, Hoboken, 2006. 350 p.
84. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen–Geiger climate classification updated // Meteorol. Z. 2006. Vol. 15, No 3. P. 259–263.
85. Kozłowski T.T. The Physiological Ecology of Woody Plants. Academic Press, San Diego–New York–Boston–London–Sidney–Tokyo–Toronto, 1990. 678 p.
86. Kozłowski T.T., Pallardy S.G. Physiology of Woody Plants. Academic Press, San Diego–London–Boston–New York–Sidney–Tokyo–Toronto, 1996. 411 p.
87. Kunkel R., Gardner W.H. Potato tuber hydration and its effect on blackspot of Russet Burbank potatoes in the Columbia Basin of Washington // American Potato Journal. 1965. Vol. 42, No 5. P. 109–124.
88. Lago J.H.G., Favero O.A., Romoff P. Microclimatic Factors and Phenology Influences in the Chemical Composition of the Essential Oils from *Pittosporum undulatum* Vent. Leaves // Journ. Braz. Chem. Soc. 2006. Vol. 17, No 7. P. 1334–1338.
89. Lavallo M. Remote Sensing of Vegetation by Polarimetric Space Interferometers: Models and Methods. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2012. 220 p.
90. Lee M.J., Jeon S.W., Song W.K. Designation for an Ecological Network using Remote Sensing: Focusing on the North-East Asia. Lambert Academic Publishing, 2013. 64 p.
91. Lepeschkin W. Beschreibung und Erklärung der Wachstumserscheinungen. In: Lehrbuch der Pflanzenphysiologie Auf Physikalisch-Chemischer Grundlage. Verlag Von Julius Springer, Berlin, 1925. P. 191–242.
92. Li Q., Nakadai A., Matsushima H., Miyazaki Y., Krensky A.M., Kawada T., Morimoto K. Phytoncides (wood essential oils) induce human natural killer cell activity // Immunopharmacol. Immunotoxicol. 2006. Vol. 28, No 2. P. 319–333.
93. Li Q., Morimoto K., Kobayashi M., Inagaki H., Katsumata M., Hirata Y., Hirata K., Shimizu T., Li Y.J., Wakayama Y., Kawada T., Ohira T., Takayama N., Kagawa T., Miyazaki Y. A forest bathing trip increases human natural killer activity and expression of anti-cancer proteins in female subjects // Journ. Biol. Regul. Homeost. Agents. 2008. Vol. 22, No 1. P. 45–55.
94. Li Q., Morimoto K., Kobayashi M., Inagaki H., Katsumata M., Hirata Y., Hirata K., Suzuki H., Li Y.J., Wakayama Y., Kawada T., Park B.J., Ohira T., Matsui N., Kagawa T., Miyazaki Y., Krensky A.M. Visiting a forest, but not a city, increases human natural killer activity and expression of anti-cancer proteins // Int. J. Immunopathol. Pharmacol. 2008. Vol. 21, No 1. P. 117–127.
95. Liao Y.C., Chang Chien S.W., Wang M.C., Shen Y., Sessaiah K. Relationship between lead uptake by lettuce and water-soluble low-molecular-weight organic acids in rhizosphere as influenced by transpiration // J. Agric. Food Chem. 2007. Vol. 17, No 55. P. 8640–8649.
96. Liao Y.C., Chien S.W., Wang M.C., Shen Y., Hung P.L., Das B. Effect of transpiration on Pb uptake by lettuce and on water soluble low molecular weight organic acids in rhizosphere // Chemosphere. 2006. Vol. 65, No 2. P. 343–351.
97. Literatur-Übersicht // Österreichische botanische Zeitschrift. 1907. Vol. 57, No 2. P. 74–85.
98. Lloyd F.E. A New and Cheap Form of Auxanometer // Torreya. 1903. Vol. 3, No 7. P. 97–100.
99. Mager P.P. Multivariate Chemometrics in QSAR: A Dialogue. Wiley, New York–Chichester–Toronto–Brisbane–Singapore, 1988, 345 p.
100. Maina J.N. The Gas Exchangers: Structure, Function, and Evolution of the Respiratory Processes. Springer, Berlin, 1998. 498 p.

101. *Malone M., Herron M., Morales M.A.* Continuous measurement of macronutrient ions in the transpiration stream of intact plants using the meadow spittlebug coupled with ion chromatography // *Plant Physiology*. 2002. Vol. 130, No 3. P. 1436–1442.
102. *McBride R., Evans M.L.* Auxin inhibition of acid-and fusicoccin-induced elongation in lentil roots // *Planta*. 1977. Vol. 136, No 2. P. 97–102.
103. *McKown A.D., Cochard H., Sack L.* Decoding leaf hydraulics with a spatially explicit model: principles of venation architecture and implications for its evolution // *American Naturalist*. 2010. Vol. 175. P. 447–460.
104. *Meron E.* *Nonlinear Physics of Ecosystems*. CRC Press, Boca Raton, 2013. 350 p.
105. *Meyer W.S., Green G.C.* Plant indicators of wheat and soybean crop water stress // *Irrigation Science*. 1981. Vol. 2, No 3. P. 167–176.
106. *Mitchell H.B.* *Multi-Sensor Data Fusion: An Introduction*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. 296 p.
107. *Mohammed G.H., Noland T.L., Irving D., Sampson P.H., Zarco-Tejada P.J., Miller J.R.* Natural and stress-induced effects on leaf spectral reflectance in Ontario species // *Forest Research Report*. 2000. No 156. 34 p.
108. *Monje O., Bugbee B.* Characterizing photosynthesis and transpiration of plant communities in controlled environments // *Acta Hort.* 1996. Vol. 40. P. 123–128.
109. *Mulkey T.J., Evans M.L., Kuzmanoff K.M.* The kinetics of abscisic acid action on root growth and gravitropism // *Planta*. 1983. Vol. 157, No 2. P. 150–157.
110. *Multispectral Image Processing and Pattern Recognition (Series in Machine Perception and Artificial Intelligence, 44)*. Ed. by *J. Shen, P.S.P. Wang, T. Zhang*. World Scientific Pub. Co Inc., Singapore–New Jersey–London–Hong Kong, 2001. 130 p.
111. *Mutaftshiev S., Prat R., Pierron M., Devilliers G., Goldberg R.* Relationships between cell-wall β -1,3-endoglucanase activity and auxin-induced elongation in mung bean hypocotyl segments // *Protoplasma*. 1997. Vol. 199, No 1-2. P. 49–56.
112. *Nelles O.* *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*. Springer, Berlin–Heidelberg–New York, 2001. 785 p.
113. *Nendza M.* *Structure-Activity Relationships in Environmental Sciences*. Chapman and Hall, London, 1998. 288 p.
114. *Nestler A.* *Das pflanzenphysiologische Institut der k. k. deutschen Universität in Prag // Österreichische botanische Zeitschrift*. 1909. Vol. 59, No 2. P. 54–62.
115. *Parida L.* *Pattern Discovery in Bioinformatics: Theory & Algorithms*. Chapman and Hall / CRC, Boca raton–London–New York, 2007. 512 p.
116. *Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A.* Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2007. Vol. 11. P. 1633–1644.
117. *Persaud K., Dodd G.* Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose // *Nature*. 1982. Vol. 299, No 5881. P. 352–355.
118. *Plant Cell Death Processes*. Ed. by *L.D. Nooden*. Academic Press, Amsterdam–Boston–Heidelberg–London–New York–Oxford–Paris–San Diego–San Francisco–Singapore–Sydney–Tokyo, 2003. 392 p.
119. *Pretzsch H.* *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Springer, Heidelberg–Dordrecht–London–New York, 2010. 683 p.
120. *Puc M., Kasprzyk I.* The patterns of *Corylus* and *Alnus* pollen seasons and pollination periods in two Polish cities located in different climatic regions // *Aerobiologia*. 2013. Vol. 29, No 4. P. 495–511.

121. *Qaderi M.M., Reid D.M.* Methane emissions from six crop species exposed to three components of global climate change: temperature, ultraviolet-B radiation and water stress // *Physiologia Plantarum*. 2009. Vol. 137, No 2. P. 139–147.
122. *Rabe-Hesketh S., Skrondal A.* Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata, Vol.1. Stata Press, College Station, Texas, 2012. 497 p.
123. *Rabe-Hesketh S., Skrondal A.* Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata, Vol. 2. Stata Press, College Station, Texas, 2012. 477 p.
124. *Raol J.R.* Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB. CRC Press, Boca Raton, 2009. 568 p.
125. *Rayle D.L., Cleland R.* Rapid Growth Responses in the Avena Coleoptile: A Comparison of the Action of Hydrogen Ions, CO₂, and Auxin // *Proceedings of the 7th International Conference on Plant Growth Substances / Australia, 1972*. P. 44–51.
126. *Röck F., Barsan N., Weimar U.* Electronic Nose: Current Status and Future Trends // *Chemical Reviews*. 2008. Vol. 108, No 2. P. 705–725.
127. *Rodriguez-Bachiller A., Glasson J.* Expert Systems and Geographic Information Systems for Impact Assessment. Taylor & Francis, London–New York, 2004. 408 p.
128. *Schwarz J., Gries R., Hillier K., Vickers N., Gries G.* Phenology of semiochemical-mediated host foraging by the western boxelder bug, *Boisea rubrolineata*, an aposematic seed predator // *J. Chem. Ecol.* 2009. Vol. 35, No 1. P. 58–70.
129. *Siddiqui K.J., Eastwood D.L., Liu Y-H.* Spectral pattern recognition: the methodology // *SPIE Proceedings*. 1999. Vol. 3854. P. 84–97.
130. *Sims D.A., Gamon J.A.* Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 81. P. 337–354.
131. *Skogestad S., Postlethwaite I.* Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. Wiley, Chichester–New York–Brisbane–Toronto–Singapore, 2005. 592 p.
132. *Spalding E.P., Miller N.D.* Image analysis is driving a renaissance in growth measurement // *Current Opinion in Plant Biology*. 2013. Vol. 16, No 1. P. 100–104.
133. *Sparks W.C.* A review of abnormalities in the potato due to water uptake and translocation // *American Potato Journal*. 1958. Vol. 35, No 3. P. 430–436.
134. *Spectral Theory And Nonlinear Analysis With Applications to Spatial Ecology*. Ed. by *Cano-Casanova S., Lopez-Gomez J., Mora-Corral C.* World Scientific Pub. Co Inc., New Jersey–London–Singapore–Beijing–Shanghai–Hong Kong–Taipei–Chennai, 2005. 276 p.
135. *Steffens B., Lüthen H.* New methods to analyse auxin-induced growth II: The swelling reaction of protoplasts – a model system for the analysis of auxin signal transduction? // *Plant Growth Regulation*. 2000. Vol. 32, No 2-3. P. 115–122.
136. *Stone G.E.* A Simple Self-Registering Auxanometer // *Botanical Gazette*. 1892. Vol. 17, No 4. P. 105–107.
137. *Taiz L., Métraux J.-P.* The kinetics of bidirectional growth of stem sections from etiolated pea seedlings in response to acid, auxin and fusicoccin // *Planta*. 1979. Vol. 146. No 2, P. 171–178.
138. *Tan Y., Siebert K.J.* Modeling bovine serum albumin binding of flavor compounds (alcohols, aldehydes, esters, and ketones) as a function of molecular properties // *Journ. Food Sci.* 2008. Vol. 73, No 1. P. 56–63.
139. *Todeschini R., Consonni V.* Molecular Descriptors for Chemoinformatics (Methods and Principles in Medicinal Chemistry). Wiley-VCH, Weinheim, 2009. 1257 p.
140. *Tucker A.O., De Baggio T.* The Encyclopedia of Herbs: A Comprehensive Reference to Herbs of Flavor and Fragrance. Timber Press, Portland - London, 2009. 604 p.

141. *van Groenigen K.J., Osenberg C.W., Hungate B.A.* Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO₂ // *Nature*. 2011. Vol. 475. P. 214–216.
142. *Vollmer M., Möllmann K.-P.* Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. Wiley-VCH, Weinheim, 2010. 612 p.
143. *W.E.B.* Botany as an Experimental Science in Laboratory and Garden // *Nature*. 1935. Vol. 136. P. 890.
144. *Warnock C.* Backyard Winter Gardening: Vegetables Fresh and Simple, In Any Climate without Artificial Heat or Electricity the Way It's Been Done for 2,000 Years. Cedar Fort, Inc. Springville, 2013. 176 p.
145. *Went F.A.F.C.* Die Bedeutung des Wuchsstoffes (Auxin) für Wachstum, photo- und geotropische Krümmungen // *Naturwissenschaften*. 1933. Vol. 21, No 1. P. 1–7.
146. *Werkhoff P., Guntert M., Krammer G., Sommer H., Kaulen J.* Vacuum Head-space Method in Aroma Research: Flavor Chemistry of Yellow Passion Fruits // *J. Agric. Food Chem.* 1998. Vol. 46. P. 1076–1093.
147. *Wise P.M., Olsson M.J., Cain W.S.* Quantification of Odor Quality // *Chemical Senses*. 2000. Vol. 25, No 4. P. 429–443.
148. *Zachor A.S.* Spectral pattern recognition in IR remote sensing // *Applied Optics*. 1983. Vol. 22, No 17. P. 2699–2703.

Поступила 06.10.14

UDC 58.02+58.056+58.055+58.03+58.087+58.084

**Chromatography-Auxanometry and Chromate-Mass-Auxanometry
in Forest Species Vegetation Phenological Monitoring Based on Gas and Flavor
Chemical Principles with Patterns Automatic Identification**

O.V. Gradov, Research Assistant, Principal Engineer

Institute of Energy Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Leninskiy pr., 38/2, Moscow, 119334, Russia; e-mail: o.v.gradov@gmail.com

A new ideology for direct auxanometric measurements is proposed, which allows to analyze growth dynamics at different developmental stages. The above measurements include long-term monitoring using optical analysis with direct mass spectroscopic and gas chromatographic detection. Based on the known flavor differences of blooming plants at various phenological stages, we propose to distinguish phenological stage dynamics of various plant species and groups according to modern trends in flavor chemistry. It is possible to perform a simultaneous chemical analysis and automatic classification of forest plants in model plant communities according to their phenorhythm types and phenological groups with the approach described using automatic pattern recognition and fingerprinting. The novel method can also provide phenospectral data ranging useful for establishing the dependence of plant growth and developmental stage phenology on the environmental factors. Since the method is based on combination of several different measurement sources, it possesses a wide application in laboratory climatic chambers as well as in natural field conditions with the equipment placed in meteorological instrument shelter like the abundant tools for meteo-climatic monitoring. In this paper we propose a novel auxanometric system which is fundamentally different from all the previously known analogues, as it allows a simultaneous monitoring of forest plant species growth together with plant development stages. Unlike the quantitative approach in standard

auxanometric measurement techniques with the shoot elongation, our system implements a comprehensive qualitative growth dynamics criterion including one-to-one correspondence between the chemical analysis of plant molecular emission and the environmental conditions variations, that allows to analyze the feedback between the plant growth/development and the environmental parameter variation. This is provided by the fact that the automatic system during operation in different modes after pattern recognition learning (with the subsequent completion of the database) allows us to investigate and simulate not only a single plant development pattern characteristic of a certain standard feature space, but also to study experimentally the response of the ecological feature structure upon the changing of external factors. The above strategy leads to the emergence of phenological, simulating-biogeographical, biometeorological, bioclimatological and ecology-physiological approaches in auxanometry. The system proposed parameter variation in the course of the germination/elongation process monitoring as needed (if it is possible within the biotron, climatic chamber or the greenhouse used for germination/elongation of forest plant species), with the following addition of the spectral and chromatographic data in the form of correlation patterns into the database for subsequent comparison. In the case of experimental phenological spectral plant germination/elongation with the described system it is possible to program and control the temperature using a feedback and thus to predict vegetation initiation accurately. This can be implemented by summing the effective temperatures or their trend detection, which allows to reconstruct the sequence of germination or vegetation of individual plant forms in correlation with the characteristic parameters of the artificial climate (for example, if known that for maple (*g. Acer*) the sum of effective temperatures is 156.2 °C, and for linden (*g. Tilia*) – 739 °C, it is obvious that in the thermal ranking database the linden will be behind the maple). Due to this fact the auxanometric described system allows automatic classification of forest plants in the model plant communities on a set of characteristics according to the phenorhythm types or phenological groups using a more scaled classification than in outdated systems. The same fact allows monitoring in a climate chamber parameter regulation mode by the plant feedback registration using their molecular emission sensors in a controlled physical environment, i.e. the registered parameters from the detector can be considered as a signal changing the chamber operation mode. The described system operates in a wide range of conditions and possesses an amount of different application fields, so it is worth being recommended for implementation in both field and laboratory practice of forest engineering.

Keywords: flavor chemistry, gas chemistry, optical spectroscopy, auxanometry, gas chromatography, gas chromatate-mass-spectrometry, phenological monitoring.

REFERENCES

1. Bumpus H.C. A Simple and Inexpensive Self-Registering Auxanometer. *Botanical Gazette*, 1887, vol. 12, no 7, pp. 149–150.
2. Barnes C.R. A Registering Auxanometer. *Botanical Gazette*, 1887, vol. 12, no. 7, pp. 150–152.
3. Stone G.E. A Simple Self-Registering Auxanometer. *Botanical Gazette*, 1892, vol. 17, no. 4, pp. 105–107.
4. Golden K.E. An Auxanometer for the Registration of Growth of Stems in Thickness. *Botanical Gazette*, 1894, vol. 19, no 3, pp. 113–116.
5. Lloyd F. E. A New and Cheap Form of Auxanometer. *Torreya*, 1903, vol. 3, no 7, pp. 97–100.

6. Bovie W.T. A Precision Auxanometer. *Botanical Gazette*, 1912, vol. 53, no 6, pp. 504–509.
7. Bovie W.T. A Simplified Precision Auxanometer. *American Journal of Botany*, 1915, vol. 2, no 2, pp. 95–99.
8. Burgerstein A. Das pflanzenphysiologische Institut der K.K. Wiener Universität von 1873-1884. *Österreichische botanische Zeitschrift*, 1884, vol. 34, no 12, pp. 418–422.
9. Fritsch K. Akademien, Botanische Gesellschaften, Vereine, Kongresse etc. *Österreichische botanische Zeitschrift*, 1905, vol. 55, no 6, pp. 245–251.
10. Literatur-Übersicht. *Österreichische botanische Zeitschrift*, 1907, vol. 57, no 2, pp. 74–85.
11. Nestler A. Das pflanzenphysiologische Institut der k. k. deutschen Universität in Prag. *Österreichische botanische Zeitschrift*, 1909, vol. 59, no 2, pp. 54–62.
12. Lepeschkin W. Lehrbuch der Pflanzenphysiologie auf Physikalisch-Chemischer Grundlage. *Beschreibung und Erklärung der Wachstumserscheinungen*, 1925, pp. 191–242.
13. Cholodny N. Über das Wachstum des vertikal und horizontal orientierten Stengels in Zusammenhang mit der Frage nach der hormonalen Natur der Tropismen. *Planta*, 1929, vol. 7, no 5, pp. 702–719.
14. Went F.A.F.C. Die Bedeutung des Wuchsstoffes (Auxin) für Wachstum, photo- und geotropische Krümmungen. *Naturwissenschaften*, 1933, vol. 21, no 1, pp. 1–7.
15. Engel H., Heimann M. Weitere Untersuchungen über periodische Guttation. *Planta*, 1949, vol. 37, no 3, pp. 437–450.
16. Sparks W.C. A review of Abnormalities in the Potato due to Water Uptake and Translocation. *American Potato Journal*, 1958, vol. 35, no 3, pp. 430–436.
17. Kunkel R., Gardner W.H. Potato Tuber Hydration and its Effect on Blackspot of Russet Burbank Potatoes in the Columbia Basin of Washington. *American Potato Journal*, 1965, vol. 42, no 5, pp. 109–124.
18. Meyer W.S., Green G.C. Plant Indicators of Wheat and Soybean Crop Water Stress. *Irrigation Science*, 1981, vol. 2, no 3, pp. 167–176.
19. Rayle D.L., Cleland R. Rapid Growth Responses in the Avena Coleoptile: A Comparison of the Action of Hydrogen Ions, CO₂, and Auxin. *Proc. the 7th Int. Conf. on Plant Growth Substances*. Australia, 1972, pp. 44–51.
20. Jaffe M.J. Thigmomorphogenesis: The Response of Plant Growth and Development to Mechanical Stimulation. *Planta*, 1973, vol. 114, no 2, pp. 143–157.
21. McBride R., Evans M.L. Auxin Inhibition of Acid- and Fusicoccin-Induced Elongation in Lentil Roots. *Planta*, 1977, vol. 136, no. 2, pp. 97–102.
22. Evans M.L., Mulkey T.J., Vesper M.J. Auxin Action on Proton Influx in Corn Roots and its Correlation with Growth. *Planta*, 1980, vol. 148, no 5, pp. 510–512.
23. Katou K., Ichino K. Effects of Carbon Dioxide on the Spatially Separate Electrogenic Ion Pumps and the Growth Rate in the Hypocotyl of *Vigna Sesquipedalis*. *Planta*, 1982, vol. 155, no 6, pp. 486–492.
24. Mulkey T.J., Evans M.L., Kuzmanoff K.M. The Kinetics of Abscisic Acid Action on Root Growth and Gravitropism. *Planta*, 1983, vol. 157, no 2, pp. 150–157.
25. Evans M.L., Ishikawa H., Estelle M.A. Responses of Arabidopsis Roots to Auxin Studied with High Temporal Resolution: Comparison of Wild Type and Auxin-Response Mutants. *Planta*, 1994, vol. 194, no 2, pp. 215–222.
26. Christian M., Lüthen H. New Methods to Analyse Auxin-Induced Growth I: Classical Auxinology Goes Arabidopsis. *Plant Growth Regulation*, 2000, vol. 32, no 2-3, pp. 107–114.

27. Steffens B., Lüthen H. New Methods to Analyse Auxin-Induced Growth II: The Swelling Reaction of Protoplasts – a Model System for the Analysis of Auxin Signal Transduction? *Plant Growth Regulation*, 2000, vol. 32, no 2-3, pp. 115–122.
28. Claussen M., Lütke H., Blatt M., Böttger M. Auxin-Induced Growth and its Linkage To Potassium Channels. *Planta*, 1997, vol. 201, no. 2, pp. 227–234.
29. Budagovskaya N.V., Guliaev V.I. Effect of Calcium Channel Blocker on the Growth Dynamics of Plants Studied by Laser Interference Auxanometry. *Developments in Plant and Soil Sciences*, 2002, vol. 92, pp. 204–205.
30. Budagovskaya N.V., Guliaev V.I. Rapid and Slow Response Reactions of Plants on Effect of Antioxidant Ambiol. *Advanced Research on Plant Lipids*, 2003, pp. 323–326.
31. Taiz L., Métraux J.-P. The Kinetics of Bidirectional Growth of Stem Sections from Etiolated Pea Seedlings in Response to Acid, Auxin and Fusicocin. *Planta*, 1979, vol. 146, no 2, pp. 171–178.
32. Fernandez S.R., Wagner E.A. New Method of Measurement and Analysis of the Stem Extension Growth Rate to Demonstrate Complete Synchronisation of *Chenopodium Rubrum* Plants by Environmental Conditions. *Journal of Plant Physiology*, 1994, vol. 144, no 3, pp. 362–369.
33. Inman-Bamber N.G. Automatic Plant Extension Measurement in Sugarcane in Relation to Temperature and Soil Moisture. *Field Crops Research*, 1995, vol. 42, no 2-3, pp. 135–142.
34. Spalding E.P., Miller N.D. Image Analysis is Driving a Renaissance in Growth Measurement. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013, vol. 16, no 1, pp. 100–104.
35. Evans M.L. Functions of Hormones at the Cellular Level of Organization. *Encyclopedia of Plant Physiology*, 1984, vol. 10, pp. 23–79.
36. Mutaftschiev S., Prat R., Pierron M., Devilliers G., Goldberg R. Relationships between Cell-Wall β -1,3-Endoglucanase Activity and Auxin-Induced Elongation in Mung Bean Hypocotyl Segments. *Protoplasma*, 1997, vol. 199, no 1-2, pp. 49–56.
37. Kim S.Y., Mulkey T.J. Effect of Ethylene Antagonists on Auxin-Induced Inhibition of Intact Primary Root Elongation in Maize (*Zeamays L.*). *Journal of Plant Biology*, 1997, vol. 40, no 4, pp. 256–260.
38. Rassadina V.A., Yaronskaya E.B., Vershilovskaya I.V., Egorov V.M., Averina N.G. Elektronnaya auksanometriya - novyy sposob registratsii rostovykh reaktsiy rasteniy [Electronic Auxanometry – is a New Method of Registration of Plant Growth Reaction]. *Zemljarobstva i ahova raslin: navukova-praktychny chasopis*, 2007, no 2, pp. 19–20.
39. Binder B.M. Rapid Kinetic Analysis of Ethylene Growth Responses in Seedlings: New Insights into Ethylene Signal Transduction. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2007, vol. 26, no 2, pp. 131–142.
40. Clarke L.J. *Botany as an Experimental Science – in Laboratory and Garden*. Oxford University Press, Milton, 1935. 138 p.
41. W.E.B. Botany as an Experimental Science in Laboratory and Garden. *Nature*, 1935, vol. 136, p. 890.
42. Mikhaylenko I.M. Matematicheskoe modelirovanie rosta rasteniy na osnove eksperimental'nykh dannykh [Mathematical Modeling of Plant Growth Based on Experimental Data]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2007, no 1, pp. 103–111.
43. Kozlowski T.T. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. San Diego–New York–Boston–London–Sidney–Tokyo–Toronto, 1990. 678 p.
44. Kozlowski T.T., Pallardy S.G. *Physiology of Woody Plants*. San Diego–London–Boston–New York–Sidney–Tokyo–Toronto, 1996. 411 p.

45. Keppeler F. et al. Methane Emissions from Terrestrial Plants under Aerobic Conditions. *Nature*, 2006, vol. 439, pp. 187–191.
46. Mukhin V.A., Voronin P.Yu. Vydelenie metana iz drevesiny zhivyykh derev'ev [Methane Emanation from Living Tree Wood]. *Fiziologiya rasteniy*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 283–289.
47. Mukhin V.A., Voronin P.Yu. Metanogennaya Aktivnost' v Drevesnykh Rastenyakh. [Methanogenic Activity in Wood Plants]. *Fiziologiya rasteniy*, 2009, vol. 56, pp. 152–154.
48. Poleskaya O.G. *Rastitel'naya kletka i aktivnye formy kisloroda* [Vegetative Cell and Oxygen Active Forms]. Moscow, 2007. 140 p.
49. Kees Jan van Groenigen, Craig W. Osenberg, Bruce A. Hungate. Increased Soil Emissions of Potent Greenhouse Gases under Increased Atmospheric CO₂. *Nature*, 2011, vol. 475, pp. 214–216.
50. Knohl A., Veldkamp E. Global Change: Indirect Feedbacks to Rising CO₂. *Nature*, 2011, vol. 475, pp. 177–178.
51. Davidson E.A., Keller M., Erickson H.E. et al. Testing a Conceptual Model of Soil Emissions of Nitrous and Nitric Oxides. *BioScience*, 2000, vol. 50, pp. 667–680.
52. Qaderi M.M., Reid D.M. Methane Emissions from Six Crop Species Exposed to Three Components of Global Climate Change: Temperature, Ultraviolet-B Radiation and Water Stress. *Physiologia Plantarum*, 2009, vol. 137, no 2, pp. 139–147.
53. Iglesias-Rodriguez M.D. et al. Phytoplankton Calcification in a High-CO₂ World. *Science*, 2008, vol. 320, pp. 336–340.
54. Beerling D.J., Franks P.J. Plant science: The hidden Cost of Transpiration. *Nature*, 2010, vol. 464, pp. 495–496.
55. McKown A.D., Cochard H., Sack L. Decoding Leaf Hydraulics with a Spatially Explicit Model: Principles of Venation Architecture and Implications for its Evolution. *American Naturalist*, 2010, vol. 175, pp. 447–460.
56. Brodribb T.J., Feild T.S. Leaf Hydraulic Evolution Led a Surge in Leaf Photosynthetic Capacity During Early Angiosperm Diversification. *Ecology Letters*, 2010, vol. 13, pp. 175–183.
57. Malone M., Herron M., Morales M.A. Continuous Measurement of Macronutrient Ions in the Transpiration Stream of Intact Plants using the Meadow Spittlebug Coupled with Ion Chromatography. *Plant Physiology*, 2002, vol. 130, no 3, pp. 1436–1442.
58. Monje O., Bugbee B. Characterizing Photosynthesis and Transpiration of Plant Communities in Controlled Environments. *Acta Hortic*, 1996, vol. 40, pp. 123–128.
59. Liao Y.C., Chang Chien S.W., Wang M.C., Shen Y., Seshaiiah K. Relationship between Lead Uptake by Lettuce and Water-Soluble Low-Molecular-Weight Organic Acids in Rhizosphere as Influenced by Transpiration. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, vol. 17, no 55, pp. 8640–8649.
60. Liao Y.C., Chien S.W., Wang M.C., Shen Y., Hung P.L., Das B. Effect of Transpiration on Pb Uptake by Lettuce and on Water Soluble Low Molecular Weight Organic Acids in Rhizosphere. *Chemosphere*, 2006, vol. 65, no. 2, pp. 343–351.
61. Kolb B., Ettre L.S. *Static Headspace-Gas Chromatography: Theory and Practice*. Wiley, Hoboken, 2006. 350 p.
62. Jennings W. *Qualitative Analysis of Flavor and Fragrance Volatiles by Glass Capillary Gas Chromatography*. New York–London–Sydney–Toronto–San Francisco, 1980. 472 p.

63. Heydanek M.G., McGorin R.J. Gas Chromatography-Mass Spectroscopy Investigations on the Flavor Chemistry of Oat Groats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1981, vol. 29, no 5, pp. 950–954.
64. Werkhoff P., Guntert M., Krammer G., Sommer H., Kaulen J. Vacuum Headspace Method in Aroma Research: Flavor Chemistry of Yellow Passion Fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, vol. 46, pp. 1076–1093.
65. Tucker A.O., DeBaggio T. *The Encyclopedia of Herbs: A Comprehensive Reference to Herbs of Flavor and Fragrance*. Portland–London, 2009. 604 p.
66. *Handbook of Fruit and Vegetable Flavors*. Ed. by Y. H. Hui. Wiley, Hoboken, 2010. 1095 p.
67. *Flavor and Health Benefits of Small Fruits* (ACS Symposium Series). Ed. by M. Qian, A. Rimando. Washington, 2010. 336 p.
68. Li Q., Nakadai A., Matsushima H., Miyazaki Y., Krensky A.M., Kawada T., Morimoto K. Phytoncides (Wood Essential Oils) Induce Human Natural Killer Cell Activity. *Immunopharmacol. Immunotoxicol.*, 2006, vol. 28, no 2, pp. 319–333.
69. Dmitriev M.T., Mishchikhin V.A., Stepanov E.V. Gazokhromatograficheskoe opredelenie fitontsidov v vozdukh[e] [Gas and Chromatography Fitocyd Definition in the Air]. *Gigiena i sanitariya*, 1983, no 7, pp. 43–45.
70. *Flavor, Fragrance, and Odor Analysis*. Ed. by R. Marsili. Boca Raton, 2011. 280 p.
71. *Flavours and Fragrances: Chemistry, Bioprocessing and Sustainability*. Ed. by R. G. Berger. Berlin–Heidelberg–New York, 2007. 664 p.
72. De Rovira D. *Dictionary of Flavors*. Wiley-Blackwell, Ames, Iowa, 2004. 736 p.
73. Wise P.M., Olsson M.J., Cain W.S. Quantification of Odor Quality. *Chemical Senses*, 2000, vol. 25, no 4, pp. 429–43.
74. Persaud K., Dodd G. Analysis of Discrimination Mechanisms in the Mammalian Olfactory System Using a Model Nose. *Nature*, 1982, vol. 299, no 5881, pp. 352–355.
75. Jin H.J., Lee S.H., Kim T.H., Park J., Song H.S., Park T.H., Hong S. Nanovesicle-Based Bioelectronic Nose Platform Mimicking Human Olfactory Signal Transduction. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, vol. 35, no 1, pp. 335–341.
76. Röck F., Barsan N., Weimar U. Electronic Nose: Current Status and Future Trends. *Chemical Reviews*, 2008, vol. 108, no 2, pp. 705–725.
77. Degenhardt D. C., Greene J. K., Khalilian A. Temporal Dynamics and Electronic Nose Detection of Stink Bug-Induced Volatile Emissions from Cotton Bolls. *Psyche*, 2012, vol. 2012, ID 236762, pp. 1–9.
78. Li Q., Morimoto K., Kobayashi M., Inagaki H., Katsumata M., Hirata Y., Hirata K., Shimizu T., Li Y.J., Wakayama Y., Kawada T., Ohira T., Takayama N., Kagawa T., Miyazaki Y. A Forest Bathing Trip Increases Human Natural Killer Activity and Expression of Anti-Cancer Proteins in Female Subjects. *Journal of Biological Regulators & Homeostatic Agents*, 2008, vol. 22, no 1, pp. 45–55.
79. Li Q., Morimoto K., Kobayashi M., Inagaki H., Katsumata M., Hirata Y., Hirata K., Suzuki H., Li Y.J., Wakayama Y., Kawada T., Park B.J., Ohira T., Matsui N., Kagawa T., Miyazaki Y., Krensky A.M. Visiting a Forest, but not a City, Increases Human Natural Killer Activity and Expression of Anti-Cancer Proteins. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, 2008, vol. 21, no 1, pp. 117–27.
80. Lago J.H.G., Favero O.A., Romoff P. Microclimatic Factors and Phenology Influences in the Chemical Composition of the Essential Oils from *Pittosporum undulatum* Vent. Leaves. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2006, vol. 17, no 7, pp. 1334–1338.

81. Schwarz J., Gries R., Hillier K., Vickers N., Gries G. Phenology of Semiochemical-Mediated Host Foraging by the Western Boxelder Bug, *Boisea rubrolineata*, an Aposematic Seed Predator. *Journal of Chemical Ecology*, 2009, vol. 35, no 1, pp. 58–70.
82. Puc M., Kasprzyk I. The Patterns of *Corylus* and *Alnus* Pollen Seasons and Pollination Periods in Two Polish Cities Located in Different Climatic Regions. *Aerobiologia*, 2013, vol. 29, no 4, pp. 495–511.
83. Fredrickson E.L., Estell R.E., Remmenga M.D. Volatile Compounds on the Leaf Surface of Intact and Regrowth Tarbush (*Flourensia cernua* DC) Canopies. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, vol. 33, no 10, pp. 1867–1875.
84. Gas Enzymology. Ed. by H. Degn, R.P. Cox, H. Toftlund. *Proceedings of a Symposium Held at Odense University, Denmark, 1984*. Dordrecht, 1985. 264 p.
85. Hanes J.M. Spring Leaf Phenology and the Diurnal Temperature Range in a Temperate Maple Forest. *International Journal of Biometeorology*, 2013. 10.1007/s00484-012-0603-1.
86. Geider R. *Algal Photosynthesis: The Measurement of Algal Gas Exchange*. New York, 1992. 256 p.
87. Maina J.N. *The Gas Exchangers: Structure, Function, and Evolution of the Respiratory Processes*. Berlin, 1998. 498 p.
88. Skogestad S., Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. Wiley, Chichester–New York–Brisbane–Toronto–Singapore, 2005. 592 p.
89. Todeschini R., Consonni V. *Molecular Descriptors for Chemoinformatics (Methods and Principles in Medicinal Chemistry)*. Weinheim, 2009. 1257 p.
90. Vershinin V.I., Derendyaev B.G., Lebedev K.S. *Komp'yuternaya identifikatsiya organicheskikh soedineniy* [Computer Identification of Organic Compounds]. Moscow, 2002. 197 p.
91. Hemmer M.C. *Expert Systems in Chemistry Research*. Boca Raton, 2007. 416 p.
92. Mitchell H.B. *Multi-Sensor Data Fusion: An Introduction*. Berlin, Heidelberg, 2010. 296 p.
93. D.L. Hall, McMullen S.A.H. *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*. Boston – London, 2004. 466 p.
94. Raol J. R. *Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB*. Boca Raton, 2009. 568 p.
95. Bergann F. Untersuchungen über Lichtwachstum, Lichtkrümmung und Lichtabfall bei *Avena sativa* mit Hilfe monochromatischen Lichtes. *Planta*, 1930, vol. 10, no 4, pp. 666–743.
96. Meron E. *Nonlinear Physics of Ecosystems*. Boca Raton, 2013. 350 p.
97. Botkin D. B. *Forest Dynamics: An Ecological Model*. Oxford–New York, 1993. 328 p.
98. Buongiorno J., Zhu S., Zhang D., Turner J., Tomberlin D. *The Global Forest Products Model: Structure, Estimation, and Applications*. Amsterdam–Boston–London–New York–Oxford–Paris–San Diego–San Francisco–Singapore–Sydney–Tokyo, 2003. 300 p.
99. Pretzsch H. *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Heidelberg–Dordrecht–London–New York, 2010. 683 p.
100. Isermann R., Münchhof M. *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*. Heidelberg–Dordrecht–London–New York, 2011. 730 p.
101. Giantomassi A. *Modeling Estimation and Identification of Complex System Dynamics: Issues and Solutions*. Saarbrücken, 2012. 136 p.
102. Nelles O. *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*. Berlin–Heidelberg–New York, 2001. 785 p.

103. A. Barrat, M. Barthélemy, A. Vespignani. *Dynamical Processes on Complex Networks*. Cambridge University Press, 2012. 361 p.
104. Lee M.J., Jeon S.W., Song W.K. *Designation for an Ecological Network using Remote Sensing: Focusing on the North-East Asia*. USA, 2013. 64 p.
105. Creswell J.W. *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Los Angeles–London–New Delhi–Singapore–Washington, 2013. 304 p.
106. Cserhati T. *Multivariate Methods in Chromatography: a Practical Guide*. Wiley, Hoboken–Chichester, 2008. 352 p.
107. Mager P.P. *Multivariate Chemometrics in QSAR: a dialogue*. New York–Chichester–Toronto–Brisbane–Singapore, 1988. 345 p.
108. Nendza M. *Structure-Activity Relationships in Environmental Sciences*. London, 1998. 288 p.
109. Bumble S. *Computer Generated Physical Properties*. Boca Raton, 1999. 288 p.
110. Drosos J.C., Viola-Rhenals M., Vivas-Reyes R. Quantitative Structure-Retention Relationships of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Gas-Chromatographic Retention Indices. *Journal of Chromatography A*, 2010, vol. 1217, no 26, pp. 4411–4421.
111. Jönsson S., Eriksson L.A., van Bavel B. Multivariate Characterisation and Quantitative Structure-Property Relationship Modelling of Nitroaromatic Compounds. *Analytica Chimica Acta*, 2008, vol. 621, no 2, pp. 155–62.
112. Du H., Wang J., Hu Z., Yao X. Quantitative Structure-Retention Relationship Study of the Constituents of Saffron Aroma in SPME-GC-MS Based on the Projection Pursuit Regression Method. *Talanta*, 2008, vol. 77, no 1, pp. 360–365.
113. Tan Y., Siebert K.J. Modeling Bovine Serum Albumin Binding of Flavor Compounds (Alcohols, Aldehydes, Esters, and Ketones) as a Function of Molecular Properties. *Journal of Food Science*, 2008, vol. 73, no 1, pp. 56–63.
114. Hoffmann E.A., Fekete Z.A., Rajkó R., Pálinkó I., Körtvélyesi T. Theoretical Characterization of Gas-Liquid Chromatographic Stationary Phases with Quantum Chemical Descriptors. *Journal of Chromatography A*, 2009, vol. 1216, no 12, pp. 2540–2547.
115. Rodriguez-Bachiller A., Glasson J. *Expert Systems and Geographic Information Systems for Impact Assessment*. London–New York, 2004. 408 p.
116. Warnock C. *Backyard Winter Gardening: Vegetables Fresh and Simple, In Any Climate without Artificial Heat or Electricity the Way It's Been Done for 2,000 Years*. Springville, 2013. 176 p.
117. Jones H.G. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge–New York–Melbourne, 1992. 456 p.
118. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen–Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, vol. 15, no 3, pp. 259–263.
119. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated World Map of the Köppen–Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, vol. 11, pp. 1633–1644.
120. *Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Sub-Tropical Forests*. Ed. by M. Kalacska, G.A. Sanchez-Azofeifa. Boca Raton–London–New York, 2008. 352 p.
121. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. Ed. by P.S. Thenkabail, J.G. Lyon, A. Huete. Boca Raton, 2011. 781 p.
122. Helt M.F. *Vegetation Identification With LIDAR*. Thes. Naval Postgraduate School. Monterey, California, 2005, 83 p.

123. Lavalle M. *Remote Sensing of Vegetation by Polarimetric Space Interferometers: Models and Methods*. Saarbrücken, 2012. 220 p.
124. Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M.N. Relationships Between Leaf Chlorophyll Content and Spectral Reflectance and Algorithms for Non-Destructive Chlorophyll Assessment in Higher Plant Leaves. *Journal of Plant Physiology*, 2003, vol. 160, pp. 271–282.
125. Biswal U.C., Biswal B., Raval M.K. *Chloroplast Biogenesis: From Proplastid to Gerontoplast*. Dordrecht–Boston–London, 2003. 380 p.
126. Mohammed G.H., Noland T.L., Irving D., Sampson P.H., Zarco-Tejada P.J., Miller J.R. Natural and Stress-Induced Effects on Leaf Spectral Reflectance in Ontario Species. *Forest Research Report*, no 156, 2000. 34 p.
127. Dasgupta S. *Remote Sensing of Vegetation Water and Fire Risk: Selected Research Topics*. Saarbrücken, 2009. 176 p.
128. Chen J.-C., Chen C.-T. Correlation Analysis Between Indices of Tree Leaf Spectral Reflectance and Chlorophyll Content. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVII, part B7, 2008, pp. 231–238.
129. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 81, pp. 337–354.
130. *Plant Cell Death Processes*. Ed. by L.D. Nooden. Amsterdam–Boston–Heidelberg–London–New York–Oxford–Paris–San Diego–San Francisco–Singapore–Sydney–Tokyo, 2003. 392 p.
131. Chang C.-I. *Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis*. Hoboken, 2013. 1164 p.
132. Chang C.-I. *Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification*. New York, 2003. 367 p.
133. Kim K.S. *3D Visualization of an Invariant Display Strategy for Hyperspectral Imagery*. Thes. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002. 67 p.
134. Beckett S. *Introduction to Time Series using Stata*. Texas, 2013. 741 p.
135. Gould W., Pitblado J., Poi B. *Maximum Likelihood Estimation with Stata*. Texas, 2010. 352 p.
136. Rabe-Hesketh S., Skrondal A. *Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata*. Texas, 2012, Vol. 1, 497 p.
137. Rabe-Hesketh S., Skrondal A. *Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata*. Texas, 2012, Vol. 2, 477 p.
138. Acock A.C. *Discovering Structural Equation Modeling Using Stata*. Texas, 2013. 304 p.
139. Kohler U., Kreuter F. *Data Analysis Using Stata*. Texas, 2012. 497 p.
140. Siddiqui K.J., Eastwood D.L., Liu Y.-H. Spectral Pattern Recognition: the Methodology. *SPIE Proceedings*, 1999, vol. 3854, pp. 84–97.
141. Zachor A.S. Spectral Pattern Recognition in IR Remote Sensing. *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no 17, pp. 2699–2703.
142. Vollmer M., Möllmann K.-P. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Weinheim, 2010. 612 p.
143. Parida L. *Pattern Discovery in Bioinformatics: Theory & Algorithms*. Boca Raton–London–New York, 2007. 512 p.
144. *Multispectral Image Processing and Pattern Recognition* (Series in Machine Perception and Artificial Intelligence, 44). Ed. by J. Shen, P. S. P. Wang, T. Zhang. Singapore–New Jersey–London–Hong Kong, 2001. 130 p.

145. Ball G.H., Hall D.J. *Isodata: a Method of Data Analysis and Pattern Classification*, California, 1965. 79 p.

146. *Spectral Theory and Nonlinear Analysis with Applications to Spatial Ecology*. Ed. by Cano-Casanova S., Lopez-Gomez J., Mora-Corral C. New Jersey–London–Singapore–Beijing–Shanghai–Hong Kong–Taipei–Chennai, 2005. 276 p.

147. Jones H.G., Vaughan R.A. *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford–New York, 2010. 400 p.

148. Gradov O.V., Notchenko A.V. Poluavtomaticheskaya Dendrokronografiya Dlya Issledovaniya Morfogeneza i Teratomorfozov na Spilakh Vysshikh Rasteniy [Semi-Automatic Dendrochronology for the Study of Morphogenesis and Teratomorphosis on Sawings on the Highest Plants]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2012, no 4(8), pp. 47–57.

Received on October 6, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.34
