

УДК 581.543+57.08+581.14+581.115+581.116.1

ХРОМАТО-АУКСАНОМЕТРИЯ І ХРОМАТО-МАС-АУКСАНОМЕТРИЯ У ФЕНОЛОГІЧНОМУ СТАДІЙНОМУ МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ ПОРІД НА ОСНОВІ ФЛЕЙВО- ТА ГАЗОХІМІЧНИХ ПРИНЦИПІВ З АВТОМАТИЧНОЮ ДИНАМІЧНОЮ ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ ПАТЕРНІВ (ТАКСОНОМІЧНИХ, МЕТЕОРОЛОГО-КЛІМАТИЧНИХ І ФЕНОСПЕКТРАЛЬНИХ)

Градов О. В.^{1,2}

¹ИНЕПХФ РАН, Москва, Россия, o.v.gradov@gmail.com

²SIAM Activity Group on Life Sciences, USA

Die uns vertrauten grünen Gewächse zeigen im allgemeinen dem flüchtigen Blicke so wenig Beweglichkeit, daß man schon genauer hinschauen muß, um sich von ihrem Vorhandensein zu überzeugen. Still und geräuschlos geht da alles vor sich, ohne Lärm, ohne Zappeln, Hasten und Fliehen. Aber man nehme sich nur die Zeit in warmen Frühlingstagen etwa eine Roßkastanie zu beobachten, wie sie ihre Knospen, entfaltet. Welch eine Fülle von Veränderungen, die da in kurzer Zeit sich folgen!

E. G. Pringsheim «Das pflanzliche Bewegungsvermögen»
(Die Reizbewegungen der Pflanzen), 1912.

Запропонована ауксанометрична система, яка: I) дозволяє спостерігати за первинним ростом лісових порід у контексті розвитку за рахунок того, що індикатором динаміки є не кількісний (як у звичайній ауксанометрії, де єдиним критерієм росту є видовження проростка), а комплексно-якісний критерій, котрий складається із взаємно однозначного зіставлення результатів аналітико-хімічного аналізу молекулярної емісії рослин і варіацій характеристик середовища, що дозволяє аналізувати зворотні зв'язки росту / розвитку рослини і деформації параметрики зовнішнього середовища, II) у ході роботи у різних режимах шляхом навчання розпізнавати образи із поповненням бази даних дозволяє досліджувати і моделювати не тільки один патерн розвитку рослини, властивий для деякого стандартного простору ознак, але й досліджувати експериментальний відгук екологічної структури ознак на зміну параметрів середовища. Тобто переходити до фенологічного, модельно-біогеографічного, біометеорологічного, біокліматологічного, еколого-фізіологічного підходу в міру дослідницької необхідності (якщо таке дозволяють параметри біотрона, кліматичної камери, оранжереї, де відбувається вигонка проростків лісових порід), заносючи спектральні і хроматографічні дані у вигляді кореляційних патернів у бази даних для наступного порівняння, III) під час феноспектральної експериментальної вигонки дозволяє програмувати і за допомогою зворотного зв'язку регулювати температуру, чітко прогнозувати подібним чином початок вегетації шляхом сумування ефективних температур або виявлення їхнього тренду, котрий дозволяє реконструювати послідовність сходів або вегетації окремих рослинних форм у кореляції з характеристичними параметрами штучного клімату (якщо відомо, що для клена (*Acer*) сума ефективних температур – 156,2 °C, а для липи (*Tilia*) – 739 °C, то очевидно, що у ранжуванні бази даних липа буде стояти пізніше від клена), IV) автоматично класифікувати за комплексом характеристик на феноритмотипи або фенологічні групи деревні рослини у модельних фітогрупуваннях по більш шкальованій градації, ніж у застарілій системі Морозової, де виділялося лише два феноритмотипи деревних рослин (вічнозелені та листопадні), V) дозволяє працювати в режимі регуляції параметрики кліматичної камери шляхом реєстрації зворотного зв'язку за рахунок використання детекторів і датчиків їх молекулярної емісії у контрольованому фізичному оточенні, тобто, самі параметри, які реєструються детектуючою частиною установки, можуть бути сигналом для зміни режиму її функціонування. Дана стаття описує не метод (оскільки розглядувана технологія базується на відомій техніці – такій як хроматографія і спектроскопія), а підхід, застосування котрого не обмежується окремими моделями або типами обладнання і системною складністю умов середовища.

Ключові слова: феноритмотипи деревних рослин, ауксанометрична система, феноспектральної вигонки техніці, сума ефективних температур, спектральні і хроматографічні дані.

ВСТУП

Як відомо, класичним і стандартним принципом вимірювання росту проростків деревних порід є ауксанометрія з використанням різноманітних ауксанометрів або їх аналогів з автоматичним записом – ауксанографів¹. Найпростіші реєструючі ауксанометри були розроблені в

¹ Тим не менш, методи реєстрації із застосуванням ауксанографів теж називають ауксанометрією, а не ауксанографією, оскільки ауксанографією у біології називають біохімічні методи в мікробіології, пов'язані з використанням ауксотрофних мутантів під час визначення дії різноманітних препаратів або виявлення оптимального середовища для культивування мікроорганізмів.

кінці XIX століття [1–4] і вперше вдосконалені в першій чверті XX століття [5, 7]. Найновіші в ті часи конструкції вже мали чутливість порядку мікрона і допускали використання для кореляційних вимірювань ростових характеристик у зіставленні із змінами складу атмосфери. Впродовж вказаного періоду, починаючи з 1884 року, журнал «*Osterreichische botanische Zeitschrift*» неодноразово публікував звіти, де згадувалось про використання подібних приладів у конкретних організаціях чи публікаціях [8–11]. Зокрема, високотехнологічну за мірками початку XX століття модель хронографічного ауксанометра можна побачити у другому томі класичної «Фізіології рослин» («*The Physiology of Plants*») Пфеффера 1903 року видання (див. рис. 1а). Дана конструкція, обладнана самописцем і циферблатом, збереглася практично незмінною до 1950-х рр., коли в Європі та США почав набирати силу тренд на автоматизацію лабораторного обладнання.

Проте у вітчизняній практиці цей тренд з'явився значно пізніше. На рис. 2б для порівняння наведено приклад зовнішнього вигляду ауксанометра з третього тому Великої радянської енциклопедії (ВРЕ) 1950 року. Як видно, він практично еквівалентний або й навіть спрощений стосовно апарата Пфеффера. Однак точно така ж конструкція була відтворена незмінною і в пізнішому виданні – у другому томі ВРЕ за 1970 рік, оскільки конструкція ауксанометрів, що застосовувалися у вітчизняній практиці, до останньої чверті XX століття фактично не відрізнялась від зарубіжних прототипів початку століття. Якщо ще у кінці XIX століття, коли подібні прилади у Росії називалися ауксанометрами, завезені або сконструйовані по аналогії прилади оснащувалися циферблатами або метричними шкалами (приклад такого пристрою нижньою циферблатною шкалою, взятий із 1-го тому Енциклопедичного словника Брокгауза і Єфрона за 1890 рік, подано на рис. 1в), то в подальшому більшість з описаних у вітчизняних роботах апаратів не дотягувало за рівнем механізації та прецизійності до багатьох застарілих зарубіжних приладів [6, 7], часто будучи не ауксанографами, як називали препарати зображені на рис. 1в, а модифікованими рутинними ауксанометрами. І якщо до деяких перших мікрометричних ауксанометрів прилаштовувався горизонтально розташований мікроскоп, то у спрощених модифікаціях його застосування не було метрологічно доцільним, оскільки точність графічної реєстрації динаміки росту на дузі диска чи барабана з папером для запису, яка досягалася використанням ауксанометричного важеля, схожого до важільця Енгельмана, котрий нерідко до сих пір використовується у поширених у вітчизняній практиці кімографах, непорівнянна із точністю мікрометричних вимірювань. Проте численні вітчизняні дослідники того часу пропонували модифікації ауксанометрів і конструювали ауксанометричні прилади на альтернативних принципах. Так, у 1920-х рр., російський емігрант В.В.Лепьошкін описав можливість застосування ауксанометрії до *Thallophytes* в «*Lehrbuch der Pflanzenphysiologie Auf Physikalisch-Chemischer Grundlage*» [12], а радянський біолог і засновник фітогормональної теорії тропізмів М.Г.Холодний розробив тип ауксанометра для аналізу ролі води (тобто ролі тургору, гутації і транспірації) для росту і тропізмів вищих рослин, названий ним мікропотометром [13] (цей прилад застосовувався в ключових експериментах М.Г.Холодного з виявлення впливу рослинних гормонів на тропізми). Згодом Вент – другий творець фітогормональної теорії тропізмів, котра сьогодні відома за кордоном як теорія Вента – Холодного, також апелював до ауксанометрії у своїй більш пізній статті 1933 року [14].

Слід зазначити, що пізніше конструкції гідрометричних ауксанометрів неодноразово використовувались в іригаційно-лісівницьких і прикладних ботанічних роботах [15–18], пов'язаних із гідратацією/дегідратацією і гутацією рослинних форм у природі, проте, як правило, за рідкісним винятком, посилання на першу статтю Холодного у них не трапляються. Іноді як середовищний контроль у польовій ауксанометрії у подібних роботах використовувалися лізиметри, що давало право говорити про «кореляційну ауксанометрію», тобто про перехід від виявлення цитофізіологічних механізмів росту окремої рослини до еколого-кліматичних і фенологічних методів моніторингу в масштабних польових умовах, однак, цей підхід був занадто трудомісткий для часу, коли ще не були впроваджені комп'ютерні мережі збору даних, і тому в практику не увійшов. У зв'язку з цим часові масштаби ауксанометричних вимірювань до кінця XX століття були теж відносно малі, і давали можливість спостерігати за ростом, але не розвитком рослин, а також їх не можна було використати для аналізу періодизації вегетації, фенологічних фаз і стадій росту у кореляції з умовами зовнішнього середовища.

Попри це, починаючи з 1970-х рр., у роботах, котрі апелювали до ауксанометрії, постійно наростає фізіолого-екологічний тренд на виявлення реактивності росту до даних умов середовища. Це було пов'язано з появою розширених можливостей для вимірювання у цьому середовищі завдяки появі доступних датчиків і приладів реєстрації фізичних і хімічних параметрів. Так, у роботі [19] було поставлено питання про заміщення (часткове) функції ауксинів стимуляцією іонами водню (рН) і вуглекислим газом, концентрація якого, як і (рН), характеризує редокс-баланс в геобіологічних системах. У роботі [20] проведено аналіз механічної реактивності і адаптивної компенсації трибологічного впливу на ріст проростка; виявлений механізм отримав назву «thigmomorphogenesis». У роботі [21] проведено порівняльний аналіз безпосереднього впливу розчину кислоти і синтетичного агента – фузікокцину, котрий індукує закислення плазми клітини (за рахунок гіперсекреції H^+), та який дає т.зв. ФС-індуковане видовження. Згодом з'явилися додаткові дані на користь гіпотези про вплив гормон-індукованої модифікації рН біля клітинної стінки на кінетику росту [22]. Пізніше ці результати було скорельовано з даними про функцію електрогенних іонних pomp [23]; тим самим у цілому було доведено єдність процесів проведення електричного сигналу (біоелектрогенезу) і росту/морфогенезу рослин. Оскільки застосування цейтраферної реєстрації [24] з тайм-кодом дозволяло взаємно однозначно зіставити кожен стан росту або тропізму проростка зі станом того чи іншого фізико-хімічного параметра, можна було скласти комплексну картину мультипараметричної кінетики росту для кожного виду, сорту чи породи деревних рослин, проте через відсутність доступної комп'ютерної техніки в ті часи цього не було зроблено.

У 1990-х рр. на зміну ауксанометрам застарілих конструкцій прийшли електронні системи з високою часовою роздільною здатністю – відеодигітайзери [25] на базі ПЗЗ-камер [26, 27] і прецизійні механоелектричні вимірювачі із використанням кутових перетворювачів [28]. На кінець 1990-х – початок 2000-х припадає і розвиток надзвичайно прогресивного методу – лазерної інтерференційної ауксанометрії [29, 30] (вперше дуплексна лазерна оптична система в ауксанометрії за різних параметрів рН і питомої електропровідності середовища, котра осмотично впливає на клітини, була використана у 1979 році [31]). Вже у 1990-х рр. цільова спрямованість установок і систем автоматизованої ауксанометрії змістилася до вимірювання росту в кореляції з умовами середовища [32, 33]. Новий ренесанс ауксанометрії із застосуванням розширеного комп'ютерного аналізу зображень [34] дозволяє взаємно однозначно зіставити (т.зв. one-to-one mapping) зони реактивності до різних факторів і зони різної інтенсивності росту в присутності цих факторів, створюючи тим самим мультимодальний підхід до аналізу ростових даних. Зокрема можна проводити спектрозональні колориметричні вимірювання поверхні рослин, аналізувати фур'є-спектри зображень на наявність анізотропії, картувати поглинання випромінювання по ізофотах та з допомогою картування градієнта або ASCII-перетворення піксельних даних, будувати векторні поля динаміки рослин за технологією motion compensation.

Таким чином, новий потужний інструмент частково здатен замінити біохімічні принципи аналізу ростових властивостей, поширені у 1980-х – 1990-х [35–37], методами «неруйнівного контролю», функціональними і для моніторингу в режимі реального часу *in vivo* чи *in situ*. Проте перекрити необхідний критичний діапазон засобів біохімічного аналізу цифрова фотографія, навіть за умов розширення її динамічного діапазону і спектрального діапазону до рівня ультрафіолетової та інфрачервоної областей, не в стані. У результаті виникає небезпека одностороннього аналізу і односторонньої же інтерпретації фізіолого-біохімічних / біофізичних даних, детермінованих браком джерел вихідної інформації.

Відхилившись від теми, слід зазначити, що особливо страждають унімодальністю, і, як наслідок, низькою репрезентативністю вітчизняні і пострадянські роботи з нових методів ауксанометрії. Не зважаючи на появу перших російськомовних статей з електронної ауксанометрії у другій половині 2000-х рр. [38], вони все ще віддалені від європейських та північноамериканських розробок початку 1990-х рр. Не допомагає при цьому т. зв. «модернізація» або «реконструкція» ранніх ауксанометричних апаратів (наприклад, «Ауксанометр КТП» Лабораторії експериментальної ботаніки Новгородського університету), оскільки фізичні принципи залишаються попередніми і часто змінюється лише форма реєстрації без конструктивної переробки і впровадження в його конструкцію нових датчиків. Навіть про банальне об'єднання

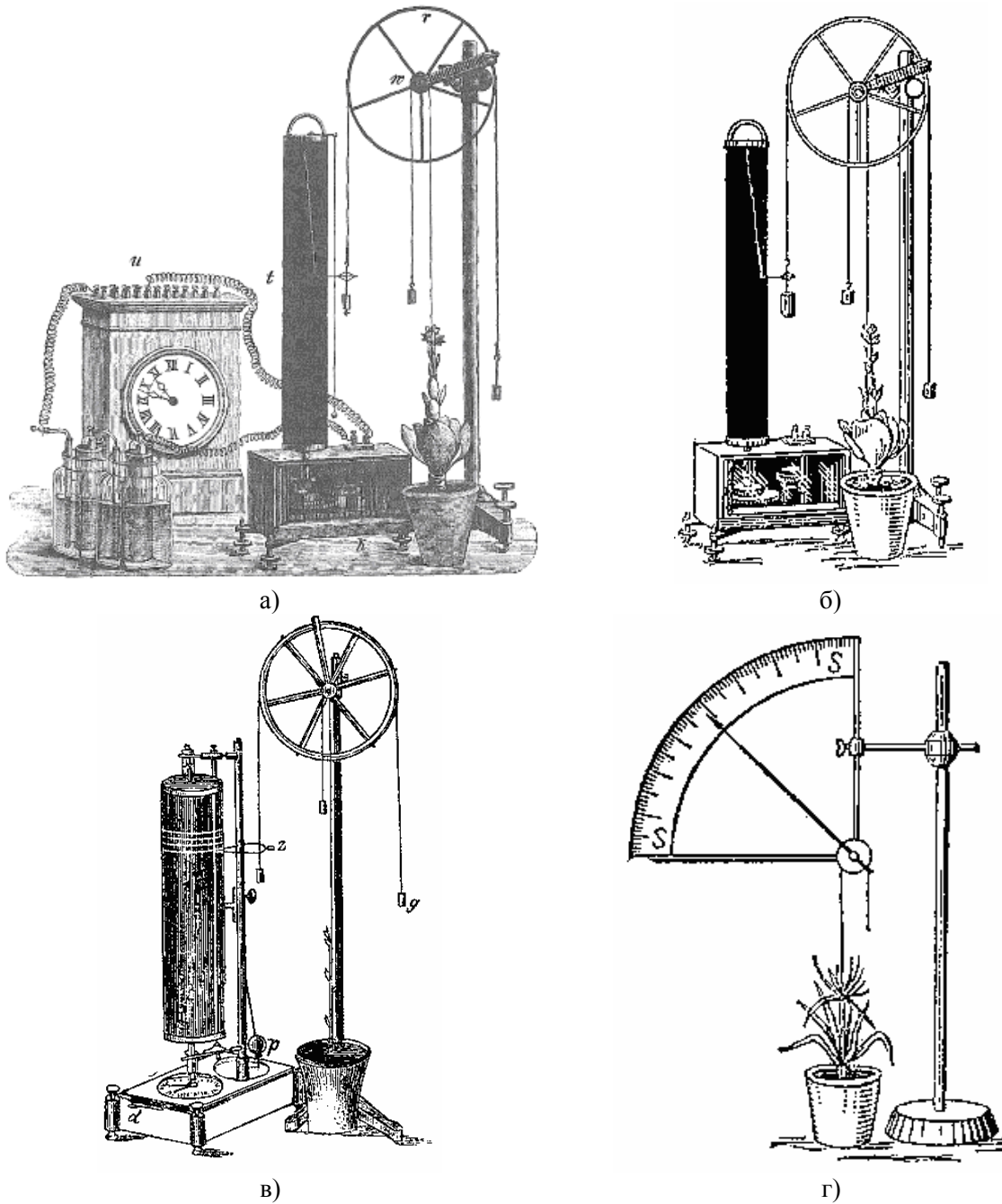


Рис. 1. Застарілі системи ауксанометрів

принципів цейтраферної зйомки з аналізом кінетики і механізмів сигналізації та зі застосуванням в подальшому методів молекулярної біології (що властиво для зарубіжних робіт цього ж періоду) у вітчизняних публікаціях мова не йде. Фактично розмито межу між навчальними ауксанометрами, котрих достатньо для студентського практикуму чи шкільної практики в класі з біологічним ухилом, і серйозних аналітичних установок, причому здійснюється ухил в сторону спрощення дослідницької техніки, а не синтезу нових прогресивних конструкцій, котрі запроваджуються у вузи і школи, на базі прецизійної аналітичної техніки. Інакше кажучи, як було написано у першій половині ХХ століття про одну із засновниць загальнодоступної експериментальної ботаніки Ліліан Кларк [40], «a time when science was still the Cinderella of the curriculum» (дослівно: «час, коли наука є Попелюшкою для освіти») [41]. Ця ситуація потребує категоріальної зміни. В іншому

випадку неминуча поява спрощених, неповних за репрезентативністю характеристичних критеріїв моделей у статтях, котрі апелюють до ауксанометрії як до верифікаційних даних [42].

ПРИНЦИПИ НОВОГО АУКСАНОМЕТРИЧНОГО ПІДХОДУ

Із викладеного вище матеріалу випливає, що є необхідною розробка технології або ж, навіть коректніше, нової ідеології ауксанометрії, котра дозволить об'єднати фізіологічний моніторинг, аналіз найбільш характеристичних біохімічних даних, отриманих в результаті «неруйнівного контролю» (тобто, за визначенням, не перешкоджають проведенню експерименту), вимірювання росту з часовою роздільною здатністю і тривалістю, достатньою для проведення фенологічної періодизації і аналізу стадійності розвитку рослин. Перехід від аналізу росту (ауксанометрії) до аналізу розвитку повинен відбуватися з урахуванням фенофаз, властивих для тих чи інших порід, а в масштабах лісових угруповань і їх лабораторних моделей, створюваних у кліматичних камерах з урахуванням природних метеоролого-кліматичних умов імітованої місцевості, супроводжуватися синтезом феноспектрів, котрі взаємно однозначно корелюють з біохімічною спектроскопією/спектрометрією, котра реєструється з часовою роздільною здатністю відповідно до вказаного вище комплексного підходу. Це очевидно, оскільки феноспектр, що демонструє за Сукачовим і Гаме переходи між фенофазами і стадії вегетації, цвітіння і т.д. аж до листопаду, однозначно відповідає фізіолого-біохімічним змінам рослини на цих стадіях, що можуть бути проаналізовані вище зазначеним шляхом. А оскільки феноспектри деревних порід поширені у лісових господарствах СНД і пострадянської Росії (там, де вони ще збережені), здійснити додатково географічну прив'язку цих даних з геоботанічним картуванням не є особливо складно.

Розглянемо детально можливості пропонованої феноспектральної ауксанометрії. Загально відомо, що основними фенофазами рослини є сокорух, поява листя, цвітіння, плодоношення і листопад. Очевидно, що: сокорух супроводжують зміни інтенсивності транспірації і зміни гідродинамічних коефіцієнтів висхідного і низхідного току; цвітіння супроводжується емісією характерних з точки зору хімічного аналізу молекул ароматичної структури, котрі залежать від фази емісії, тобто від часу взяття проби; ця емісійна характеристика змінюється при переході до плодоношення (хоча перші ароматичні профілі можна реєструвати і на стадії появи листя); листопад супроводжується емісією продуктів розпаду листя і пігментного розпаду і т.д. Усі продукти та аддукти фізіологічної емісії хімічно визначаються із використанням неруйнівних стосовно рослини-«емітера» методів атмосферного спектрального аналізу і газової хроматографії середовища.

Розглянемо, що можна зареєструвати із застосуванням газової хроматографії та інтерпретувати як характеристичні детермінанти тих чи інших стадій розвитку рослин і модельних рослинних угруповань.

По-перше, мова, очевидно, ведеться про гази. З точки зору фізіологічної екології лісових рослин [43], яка є кооперативним розширенням загальної фізіології лісових рослин [44], емісія кисню не є єдиним «газохімічним» критерієм для фітоугруповання, оскільки слід враховувати екологічні зворотні зв'язки, котрі детермінують фізіологію емісійного масиву в цілому. Так, зокрема, порівняно недавно було виявлено, що рослини різних кліматичних зон здатні до метаногенезу [45], після чого у багатьох країнах (у тому числі і Росії [46, 47]) розгорнуто дослідження форм метаногенної активності деревних рослин. Стало також відомо, що рослини здатні до емісії NO у кількості, достатній для вимірювання методами газової хроматографії (GC) і газової хромато-мас-спектрометрії (GC-MS) [48]. Крім того, потрібно враховувати зв'язки ґрунт-ліс в аналізі газової емісії, оскільки збільшення концентрації вуглекислого газу, що знижує регулюючий ефект рослинності, викликає збільшення емісії інших парникових газів (закису азоту і метану) з ґрунту [49–51], причому несприятливі для рослин кліматичні фактори стимулюють їхню власну емісію парникових газів [52]. На відміну від деяких представників фітопланктону [53], для котрих збільшення концентрації вуглекислого газу тягне за собою збільшення продуктивності, для лісових масивів цей принцип не діє, тому необхідно суворо ставитися до виявлення коректного зворотного зв'язку у фізіолого-екологічних процесах у лісовому угрупованні (для чог, зокрема, можна використовувати пропонований феноспектральний підхід).

По-друге, мова ведеться про моніторинг транспірації. Це частково корелює із газодинамічним моніторингом, оскільки кліматична конвекція, яка регулює фази осциляції вмісту вуглекислоти в атмосфері, регулює також і температуру повітряних мас, що впливає на випаровування/транспірацію рослин, з позиції гідраліки листка [54–56]. Елементний склад виділеного під час транспірації досліджується методами хроматографії як і тоді, коли мова йде про транспіраційні потоки на поверхні, так і тоді, коли мова йде про транспірацію коренів в конденсованому середовищі [57–60]. Ідеалізація під час вирішування відповідної модельної задачі *in vitro* в герметизованих умовах у термінології зарубіжної газової хроматографії може бути означена як відношення між *sample phase* і *headspace (gas phase)*, де роль *headspace* виконує атмосфера або експериментальне середовище кліматичної камери, а *sample phase* – рідинна поверхня транспірації (по аналогії з [61]). Тому, якщо створювати герметичну кліматичну камеру з підведеними каналами газового хроматографа і відповідною їй системою відбору газових проб, то можна здійснити аналог «*static headspace – gas chromatography*» з часовою роздільною здатністю у нативному середовищі. Це дозволить одночасно аналізувати транспірацію і зміни газового складу стандартизованого кліматичного середовища, роблячи висновки про основні обмінні процеси між біомасою рослин і модельним оточуючим середовищем з точки зору фізіологічної екології лісових насаджень [43].

По-третє, газова хроматографія ², у тому числі GC-MS та вказаний вище *Headspace Method*, може бути використана для аналізу та ідентифікації по комп'ютерних базах даних запахів, які випускають лісові рослини [62–64]. Як відомо, лісові дерева і ярусні рослини, що входять до складу фітоугруповань, що їх підтримують, здійснюють емісію характерних ароматичних речовин у достатніх для органолептичного визначення кількостях як на стадії цвітіння, так і на стадії плодоношення [65–67]. Окрім того дерева часто виділяють фітонциди [68], які стандартно визначаються методами газової хроматографії [69]. Фітонцидна активність емісії максимальна під час світлової фази фотосинтезу, а мінімальна вночі – під час темної, причому інтенсивність генерації фітонцидів кореляційно пов'язана з інтенсивністю дихання, температурою повітря та іншим. При цьому, що характерно для пропонованого методу в лісовій практиці, вища активуюча діяльність фітонцидів властива для лісів, а не міських насаджень [78–79]. Під час визначення летких органічних речовин у кліматичних камерах можна застосовувати бокси достатньо великого об'єму, оскільки радіус дії тих же фітонцидів становить 3–5 метрів (за інгібуванням мікроорганізмів в біотестерах). Сучасні методи аналізу і біопроектингу запахів (див. наприклад, зб. [70–71]) дозволяють визначати досить тонкі композиції не у словниково-дефінітивному [72], а у точному аналітичному сенсі, адже розвиток технологій автоматичного кількісного визначення запахів [73] (зокрема – постійно вдосконалюваних і уже впроваджених у практику в деяких зарубіжних організаціях технологій типу «*electronic nose*» [74–77]) дає можливість не апелювати до людського сприйняття під час класифікації ароматів, котрі визначаються машинним шляхом. Необхідність аналізу запахів у фенологічному вигляді можна пояснити тим, що: мікрокліматичні і фенологічні фактори впливають на хімічний склад їх носіїв [80], семіохімічні характеристики рослинних сигналів для рослин-запилювачів і функціонально-протилежних хімічно-відлякуючих факторів змінюються залежно від часу [81], палінологічні патерни сезонів цвітіння у різних видів рослин відрізняються залежно від кліматичних факторів і географічних параметрів, котрі визначають фенологію даного виду чи угруповання, а відтак – і їх одорологічні характеристики змінюються синхронно або ж корелятивно із першим [82]. Таким чином, машинний (тобто не суб'єктивно одорологічний, а коректний флейвохімічний – хроматографічний) аналіз джерел запаху рослин неминучий. Оскільки у дослідженні емісії летких сполук з листової поверхні часто застосовують газову хромато-мас-спектрометрію (GC-MS) [83], то можна не обмежувати детектування звичайною газовою хроматографією³, а ставити на виході вище вказаної хромато-

² Це доцільно здійснювати із застосуванням сорбційних трубок для збору летких органічних сполук і термодесорбера при відборі комірною FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) або, що логічно у випадку лабораторної прогонки методу – будь-якими методами з подачею із кліматичної камери.

³ Газово-біохімічні дослідження, не зважаючи на очевидну належність більшості біохімічних агентів до частково впорядкованих, рідких та конденсованих середовищ, не слід розглядати у даному методі як

ауксанометричної установки мас-спектрометр, переходячи тим самим від методу хромато-ауксанометрії до хромато-мас-ауксанометрії.

Оскільки фенологія рослинних форм залежить від потоку вуглецю, вологості середовищ, добового температурного діапазону і поверхневого енергетичного балансу [85], необхідно зіставляти в базах даних управляючого програмного забезпечення установки дані хроматографії або хромато-мас-спектрометрії з даними вимірювань параметрів зовнішніх середовищ, за яких проводилося вимірювання у кожен момент часу моніторингу. Слід зазначити, що частково на значний відсоток цих параметрів буде впливати і мікрофауна, оскільки газообмін у фотосинтезі [86] протилежний до газообміну у респірації мікрофауни [87], що позначається і на рівні їх взаємодії в рамках фізіологічної екології [43]. Необхідно або передбачити відсутність мікрофауни (безхребетних) в ґрунті і на рослинах у вигляді карантину проростків чи саджанців на етапі їх підготовки до експериментальної роботи/моніторингу, або знайти способи їх еколого-фізіологічного урахування в математичній моделі, що описує вплив їх молекулярної емісії на рівновагу системи з урахуванням численних зворотних зв'язків [88]. Вказані вище приклади абіотичних і біотичних факторів, котрі здатні вносити спотворення у процес спостереження за описаною локалізованою моделлю лісорозведення, наведено з метою демонстрації агрохімічної комплексності системи, через що неминуче необхідно впроваджувати додаткові способи аналізу та збору даних.

Як правило, у комп'ютерній ідентифікації органічних сполук використовують не одну методику, а комплекс методів, які визначають і кількісні і якісні особливості досліджуваного аналіта з позицій різних молекулярних дескрипторів [89] відповідно з вимірюваними апаратними методами характеристиками. У вітчизняній практиці рекомендується не обмежуватись спектроскопічними методами, а застосовувати також хроматографію і мас-спектрометрію при комп'ютерній ідентифікації за базами даних [90]. Оскільки у випадку запропонованої ідеології розробки/програмування установки система буде подавати сигнали у режимі реального часу, регулюватися і допускати визначення комплексної параметрики через діагностику власного внутрішнього стану за усіма джерелами сигналу, мова йде, по суті, про розробку експертної хімічної системи [91] з функцією мультисенсорного синтезу потокових даних [92–94] і комплексної ідентифікації, яка відповідає збору сигналів з численних джерел. Так як здавна з ауксанометрами (починаючи з 1930-х рр.) гібридували монохроматори і спектрографі-монохроматори⁴ [95], логічним є використання в якості доповнення до газового хроматографа, як мінімум, оптичного спектрального аналізу (що відповідає [90]). Оскільки з токи зору нелінійної фізики екосистем [96], динаміка екстремумів спектрів під час вегетації і під час переходу від одного стану до іншого при чергуванні фенофаз буде мати нелінійний характер, що відповідає біофізичній кінетиці вказаного процесу, а у більшості самоузгоджених моделей лісової динаміки [97–99] є нелінійність і відповідні їй зворотні зв'язки, очевидно, що ідентифікаційні властивості експериментального об'єму як динамічної системи [100], котрі інтерпретуються як параметри комплексної системної динаміки [101] для нелінійної ідентифікації [102] процесів у комплексних мережах [103], якими є екологічні системи з позицій синтезу мультисенсорної інформації (зокрема – у системах дистанційного зондування [104]).

З позицій ММА-підходу (Mixed Methods Approaches – гібридизація відмінних методів з метою верифікації і встановлення фальсифікованості кожного з них і загального масиву даних, отриманих з їх допомогою) [105], лише зіставлення даних газової хроматографії, оптичної спектроскопії і кліматичного моніторингу може дати достатньо якісну і однозначну картину процесів, які відбуваються в установці на різних рівнях ендекологічної та екзоєкологічної зв'язності у ній, внаслідок чого неможливо ставити питання про систематичну ідентифікацію і фінгерпринтинг індивідуальних видових фенофаз без забезпечення контрольованих умов середовища. Оскільки в тій же газовій хроматографії для вирішення таких складних, не

екзотику, оскільки ще у 1980-ті рр. за кордоном проводилися роботи газово-біохімічного спрямування і конференції з різних підгалузей цього напрямку (наприклад зокрема газової ензимології [84]).

⁴ Це можна також пов'язати з методами лазерної ауксиметрії при використанні монохроматичного (за визначенням) лазерного випромінювання [29, 30].

вирішуваних в межах звичайних методичних підходів, проблем використовують ПЗ для хемометрики зі складним математичним аналізом [106] (так звані багатовимірні методи – Multivariate Methods), причому багатовимірна хемометрика може бути зіставлена з методами визначення структурних кореляцій окремих біохімічних властивостей [107] в рамках підходу QSAR (quantitative structure activity relationships), це актуально для ідеології конструювання цього типу установок, так як методи QSAR широко застосовуються під час моделювання відгуку оточуючого середовища на зовнішні впливи [108], причому давно створені комп'ютерні методи підбору відгуку за фізичними властивостями молекулярних агентів [109]. Такий підхід справедливий і для зворотних завдань, так що можна використовувати його і в ході моделювання під час моніторингу молекулярної емісії лісових рослин та їх угруповань (наприклад, в описуваній установці або в установках типу БИОТРОН, ФИТОТРОН із системою збору, що адекватна до описаної для цієї установки)⁵. Зазвичай мультимодальні і мультипараметричні системи збору дистанційної інформації використовуються лише у гібридизації із географічними інформаційними системами (GIS) для глобального моніторингу [115], проте для фітофізіологічної прогонки лісових систем можна частково замінити апроксимацію глобальної динаміки (з інтерполяцією на достатньо локальні об'єкти) фітотронною прогонкою з мультипараметричною реєстрацією при варіюванні експериментальних умов середовища в установках/апаратах, які конструктивно схожі з пропонуваними в даній роботі (навіть до апробації зимової реєстрації вітальних параметрів під час морозостійкої вигонки лісових порід [116]) у штучному мікрокліматі, котрий моделює відповідні географічні області та індукує відповідні йому кількісно визначувані фітофізіологічні реакції [117]⁵.

У мультипараметричних системах дистанційного зондування, як правило, для детектування рослинності використовують принципи гіперспектрального картування [120, 121] та лідарні методи, зокрема – з використанням лазерної лідарної техніки [122] (не враховуючи ресурсомістких методів, котрі потребують використання інтерференційно-поляриметричної техніки [123]), тому використання монохроматорів або лазерної техніки скануючого зчитування у хромато-ауксиметричних установках для цілковитої репрезентативності стосовно GIS-прототипу логічно поєднувати зі спектральним картуванням поверхні рослин. Це завдання не є зайвим, оскільки відомо, що у різних умовах середовища спектрально-рефлектометричні характеристики можуть мати градієнт навіть в однієї рослини, що може бути зумовлено: різною доступністю випромінювання фотосинтетичного діапазону для листка і зміною пігментної концентрації, що з цим корелює [124], зміною пігментного складу листка під час біогенезу пластид у процесі переходу від пропластид до зрілих та у подальшому до геронтопластів [125], стресом листка [126] (який, як вказувалось раніше, призводить і до зміни молекулярної емісії газів рослиною), зміною вмісту води і співвідношення води та окислюваних форм у складі рослини [127], градієнтом вмісту хлорофілу [128], відмінностями стадійних форм рослин і дефінітивної структури листка, що відповідає цим формам [129] до некаральних змін листка [130], які супроводжуються молекулярною газовою емісією тією мірою, яка дозволяє порівнювати спектри відбивання хроматограми листка або мас-спектри виділень, зареєстрованих «у лінію» одночасно зі спектрами відбивання за багатоканальною системою. Спектральне картування можна здійснювати у поточному порядку в режимі реального часу із використанням цифрових камер, що охолоджуються (в ідеалі, проте необов'язково), і подальшого математичного опрацювання при паралельній класифікації результатів на мейнфреймах [131, 132] із подальшою 3D візуалізацією [133].

Під час використання багатопроцесорних / багатоядерних машин для обрахунку даних ауксанометричної установки з гібридизацією фізичних принципів вимірювань можна використати

⁵ Слід зазначити, що QSAR щільно увійшов у практику автоматизованої інтерпретації даних газової хроматографії ароматичних сполук [110, 111] і сполук, котрі входять до складу ароматичних композицій рослин [112, 113], тому використання QSAR-підходу у флейвохімічному фінгерпринтингу лісових екосистем та їх моделей в описуваній установці має вагомні підстави до застосування. У той же час у теоретичній хімії існують роботи по квантово-хімічних дескрипторах у GLPC [114], що дає можливість для простих газів, задіяних у фотосинтезі та диханні, теж використовувати ідеї QSAR.

STATA/MP, оскільки цей пакет допускає не лише обробку рядів динаміки (часових рядів) [134], отриманих з установки, але і визначення ступеню їх правдоподібності [135], багатовимірне моделювання, що відповідає багатофакторній стратегії збору даних [136, 137], а також виявлення причинно-наслідкових зв'язків при використанні структурних рівнянь [138], не враховуючи звичайного регресійного аналізу [139]. Таким чином, до завдань розпізнавання образів спектрів [140] (і зокрема – IR-спектрів [141], оскільки допустима мультиспектральна/гіперспектральна зйомка в ІЧ-діапазоні [142], здатна демонструвати теплові властивості листя в кліматичній камері), що вирішуються програмним шляхом в рамках інтерпретації даних спектрального моніторингу як патернів, характеристичних з точки зору біоінформатики [143], у випадку гіперспектральної фотографічної реєстрації додаються завдання multispectral pattern recognition (див., наприклад, зб. [144]) в усіх спектральних діапазонах в дусі техніки ISODATA [145], причому в динаміці до них ще додається новий рівень спектральних даних – продукт віконної спектральної обробки варіацій параметрів фітофізіології у часових циклах, котрі обумовлені циркадними і фенологічними ритмами [146]. У такому випадку до звичайних оптичних та інших даних, отриманих в процесі дистанційного зондування рослинності в рамках стандартних фізичних принципів, котрі реалізуються за неможливості фіксування детектора, котрий рухається, на окремих елементах флори під час моніторингу [147], при стаціонарному розміщенні детекторів у ауксанометрії додається можливість аналізу фенологічної або феноспектральної динаміки цих факторів та індикаторів фізіологічного відгуку (до якої, власне, і застосовують методи нелінійного екологічного аналізу [146], у тому числі в рамках фізіологічної екології деревних рослин [43]). Таким чином, очевидно: гібридизація оптичної, хроматографічної та мультиспектральної фотографічної інформації потребує значних обчислювальних ресурсів на виході установки, проте результати повної комп'ютерної обробки такого типу повністю виправдовуються прогностичними властивостями формованої моделі, яку можна використати у лісорозведенні з прагматичною метою. Тобто, інакше кажучи, замість ауксанометрії як моніторингу минулих коефіцієнтів росту (які визначаються також через конформні перетворення морфометричним шляхом саджанця/сіянця лісових порід, таким чином отримуємо якісну ідентифікацію фаз розвитку та багатопараметричну еквівалент-модель, яка дає можливість передбачати (на обмежений проміжок часу), у тому числі – для програмованих змін параметризовуваних властивостей довколишнього середовища.

ВИСНОВКИ

Таким чином, запропонована інноваційна ауксанометрична система, яка:

I) дозволяє спостерігати за первинним ростом лісових порід у контексті розвитку за рахунок того, що індикатором динаміки є не кількісний (як у звичайній ауксанометрії, де єдиним критерієм росту є видовження проростка), а комплексно-якісний критерій, котрий складається із взаємно однозначного зіставлення результатів аналітико-хімічного аналізу молекулярної емісії рослин і варіацій характеристик середовища, що дозволяє аналізувати зворотні зв'язки росту/розвитку рослини і деформації параметрики зовнішнього середовища,

II) у ході роботи у різних режимах шляхом навчання розпізнавати образи із поповненням бази даних дозволяє досліджувати і моделювати не тільки один патерн розвитку рослини, властивий для деякого стандартного простору ознак, але й досліджувати експериментальний відгук екологічної структури ознак на зміну параметрів середовища. Тобто переходити до фенологічного, модельно-біогеографічного, біометеорологічного, біокліматологічного, еколого-фізіологічного підходу в міру дослідницької необхідності (якщо таке дозволяють параметри біотрона, кліматичної камери, оранжереї, де відбувається вигонка проростків лісових порід), заносючи спектральні і хроматографічні дані у вигляді кореляційних патернів у бази даних для наступного порівняння,

III) під час феноспектральної експериментальної вигонки дозволяє програмувати і за допомогою зворотного зв'язку регулювати температуру, чітко прогнозувати подібним чином початок вегетації шляхом сумування ефективних температур або виявлення їхнього тренду, котрий дозволяє реконструювати послідовність сходів або вегетації окремих рослинних форм у

кореляції з характеристичними параметрами штучного клімату (якщо відомо, що для клена Асер сума ефективних температур – 156,2 °С, а для липи (*Tilia*) – 739 °С, то очевидно, що у ранжуванні бази даних липа буде стояти пізніше від клена),

IV) автоматично класифікувати за комплексом характеристик на феноритмотипи або фенологічні групи деревні рослини у модельних фітоагрупуваннях по більш шкальованій градації, ніж у застарілій системі Морозової, де виділялося лише два феноритмотипи деревних рослин (вічнозелені та листопадні),

V) дозволяє працювати в режимі регуляції параметрики кліматичної камери шляхом реєстрації зворотного зв'язку за рахунок використання детекторів і датчиків їх молекулярної емісії у контрольованому фізичному оточенні, тобто, самі параметри, які реєструються детектуючою частиною установки, можуть бути сигналом для зміни режиму її функціонування.

Дана стаття описує не метод (оскільки розглядувана технологія базується на відомій техніці – такій як хроматографія і спектроскопія), а підхід, застосування котрого не обмежується окремими моделями або типами обладнання і системною складністю умов середовища.

Подяка. Виражається загальна подяка усім студентам-практикантам, які брали участь у складанні установки, публікація матеріалів про яку з їх участю передбачається найближчим часом, а також колегам з США і Китаю, з якими підтримувалася листування на момент написання огляду.

Список літератури

1. Bumpus H. C. A Simple and Inexpensive Self-Registering Auxanometer / H. C. Bumpus // *Botanical Gazette*. – 1887. – Vol. 12, No. 7. – P. 149–150.
2. Barnes C. R. A Registering Auxanometer / C. R. Barnes // *Botanical Gazette*. – 1887. – Vol. 12, No. 7. – P. 150–152.
3. Stone G. E. A Simple Self-Registering Auxanometer / G. E. Stone // *Botanical Gazette*. – 1892. – Vol. 17, No. 4. – P. 105–107.
4. Golden K. E. An Auxanometer for the Registration of Growth of Stems in Thickness / K. E. Golden // *Botanical Gazette*. – 1894. – Vol. 19, No. 3. – P. 113–116.
5. Lloyd F. E. A New and Cheap Form of Auxanometer / F. E. Lloyd // *Torrey*. – 1903. – Vol. 3, No. 7. – P. 97–100.
6. Bovie W. T. A Precision Auxanometer / W. T. Bovie // *Botanical Gazette*. – 1912. – Vol. 53, No. 6. – P. 504–509.
7. Bovie W. T. A Simplified Precision Auxanometer / W. T. Bovie // *American Journal of Botany*. – 1915. – Vol. 2, No. 2. – P. 95–99.
8. Burgerstein A. Das pflanzenphysiologische Institut der K.K. Wiener Universität von 1873–1884 / A. Burgerstein // *Österreichische botanische Zeitschrift*. – 1884. – Vol. 34, No. 12. – P. 418–422.
9. Fritsch K. Akademien, Botanische Gesellschaften, Vereine, Kongresse etc. / K. Fritsch // *Österreichische botanische Zeitschrift*. – 1905. – Vol. 55, No. 6. – P. 245–251.
10. Literatur-Übersicht // *Österreichische botanische Zeitschrift*. – 1907. – Vol. 57, No. 2. – P. 74–85.
11. Nestler A. Das pflanzenphysiologische Institut der k. k. deutschen Universität in Prag / A. Nestler // *Österreichische botanische Zeitschrift*. – 1909. – Vol. 59, No. 2. – P. 54–62.
12. Lepeschkin W. Lehrbuch der Pflanzenphysiologie Auf Physikalisch-Chemischer Grundlage / W. Lepeschkin // *Beschreibung und Erklärung der Wachstumserscheinungen*. – 1925. – P. 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 / N. Cholodny // *Planta*. – 1929. – Vol. 7, No. 5. – P. 702–719.
14. Went F. A. F. C. Die Bedeutung des Wuchsstoffes (Auxin) für Wachstum, photo- und geotropische Krümmungen / F. A. F. C. Went // *Naturwissenschaften*. – 1933. – Vol. 21, No. 1. – P. 1–7.
15. Engel H. Weitere Untersuchungen über periodische Guttation / H. Engel, M. Heimann // *Planta*. – 1949. – Vol. 37, No. 3. – P. 437–450.
16. Sparks W. C. A review of abnormalities in the potato due to water uptake and translocation / W. C. Sparks // *American Potato Journal*. – 1958. – Vol. 35, No 3. – P. 430–436.
17. Kunkel R. Potato tuber hydration and its effect on blackspot of Russet Burbank potatoes in the Columbia Basin of Washington / R. Kunkel, W. H. Gardner // *American Potato Journal*. – 1965. – Vol. 42, No. 5. – P. 109–124.
18. Meyer W. S. Plant indicators of wheat and soybean crop water stress / W. S. Meyer, G. C. Green // *Irrigation Science*. – 1981. – Vol. 2, No. 3. – P. 167–176.
19. Rayle D. L. Rapid Growth Responses in the Avena Coleoptile: A Comparison of the Action of Hydrogen Ions, CO₂, and Auxin / D. L. Rayle, R. Cleland // *Proceedings of the 7th International Conference on Plant Growth Substances*. Australia, 1972. – P. 44–51.
20. Jaffe M. J. Thigmomorphogenesis: The response of plant growth and development to mechanical stimulation / M. J. Jaffe // *Planta*. – 1973. – Vol. 114, No. 2. – P. 143–157.
21. McBride R. Auxin inhibition of acid- and fusicoccin-induced elongation in lentil roots / R. McBride, M. L. Evans // *Planta*. – 1977. – Vol. 136, No. 2. – P. 97–102.

22. Evans M. L. Auxin action on proton influx in corn roots and its correlation with growth / M. L. Evans, T. J. Mulkey, M. J. Vesper // *Planta*. – 1980. – Vol. 148, No. 5. – P. 510–512.
23. Katou K. Effects of carbon dioxide on the spatially separate electrogenic ion pumps and the growth rate in the hypocotyl of *Vigna sesquipedalis* / K. Katou, K. Ichino // *Planta*. – 1982. – Vol. 155, No. 6. – P. 486–492.
24. Mulkey T. J. The kinetics of abscisic acid action on root growth and gravitropism / T. J. Mulkey, Evans M. L., K. M. Kuzmanoff // *Planta*. – 1983. – Vol. 157, No. 2. – P. 150–157.
25. Evans M. L. Responses of Arabidopsis roots to auxin studied with high temporal resolution: Comparison of wild type and auxin-response mutants / M. L. Evans, H. Ishikawa, M. A. Estelle // *Planta*. – 1994. – Vol. 194, No. 2. – P. 215–222.
26. Christian M. New methods to analyse auxin-induced growth I: Classical auxinology goes Arabidopsis / M. Christian, H. Lüthen // *Plant Growth Regulation*. – 2000. – Vol. 32, No. 2–3. – P. 107–114.
27. Steffens B. New methods to analyse auxin-induced growth II: The swelling reaction of protoplasts – a model system for the analysis of auxin signal transduction? / B. Steffens, H. Lüthen // *Plant Growth Regulation*. – 2000. – Vol. 32, No. 2–3. – P. 115–122.
28. Claussen M. Auxin-induced growth and its linkage to potassium channels / M. Claussen, H. Lüthe, M. Blatt, M. Böttger // *Planta*. – 1997. – Vol. 201, No. 2. – P. 227–234.
29. Budagovskaya N. V. Effect of calcium channel blocker on the growth dynamics of plants studied by laser interference auxanometry / N. V. Budagovskaya, V. I. Guliaev // *Developments in Plant and Soil Sciences*. – 2002. – Vol. 92. – P. 204–205.
30. Budagovskaya N. V. Rapid and Slow Response Reactions of Plants on Effect of Antioxidant Ambiol / N. V. Budagovskaya, V. I. Guliaev // *Advanced Research on Plant Lipids*. – 2003. – P. 323–326.
31. Taiz L. The kinetics of bidirectional growth of stem sections from etiolated pea seedlings in response to acid, auxin and fusicoccin / L. Taiz, J.-P. Métraux // *Planta*. – 1979. – Vol. 146, No. 2. – P. 171–178.
32. Fernandez S. R. A New Method of Measurement and Analysis of the Stem Extension Growth Rate to Demonstrate Complete Synchronisation of *Chenopodium rubrum* Plants by Environmental Conditions / S. R. Fernandez, E. Wagner // *Journal of Plant Physiology*. – 1994. – Vol. 144, No. 3. – P. 362–369.
33. Inman-Bamber N. G. Automatic plant extension measurement in sugarcane in relation to temperature and soil moisture / N. G. Inman-Bamber // *Field Crops Research*. – 1995. – Vol. 42, No. 2–3. – P. 135–142.
34. Spalding E. P. Image analysis is driving a renaissance in growth measurement / E. P. Spalding, N. D. Miller // *Current Opinion in Plant Biology*. – 2013. – Vol. 16, No. 1. – P. 100–104.
35. Evans M. L. Functions of Hormones at the Cellular Level of Organization / M. L. Evans // *Encyclopedia of Plant Physiology*. – 1984. – Vol. 10. – P. 23–79.
36. Mutaftschiev S. Relationships between cell-wall β -1,3-endoglucanase activity and auxin-induced elongation in mung bean hypocotyl segments / S. Mutaftschiev, R. Prat, M. Pierron, G. Devilliers, R. Goldberg // *Protoplasma*. – 1997. – Vol. 199, No. 1–2. – P. 49–56.
37. Kim S. Y., Mulkey T. J. Effect of ethylene antagonists on auxin-induced inhibition of intact primary root elongation in maize (*Zea mays L.*) / S. Y. Kim, T. J. Mulkey // *Journal of Plant Biology*. – 1997. – Vol. 40, No. 4. – P. 256–260.
38. Рассадина В. А. Электронная ауксанометрия – новый способ регистрации ростовых реакций растений / В. А. Рассадина, Е. Б. Яронская, И. В. Вершиловская, В. М. Егоров, Н. Г. Аверина // *Земляробства і ахова раслін: навукова-практычны часопіс*. – 2007. – № 2. – С. 19–20.
39. Binder B. M. Rapid Kinetic Analysis of Ethylene Growth Responses in Seedlings: New Insights into Ethylene Signal Transduction / B. M. Binder // *Journal of Plant Growth Regulation*. – 2007. – Vol. 26, No. 2. – P. 131–142.
40. Clarke L. J. Botany As An Experimental Science – In Laboratory And Garden / L. J. Clarke. – Milton: Oxford University Press, 1935. – 138 p.
41. W. E. B. Botany as an Experimental Science in Laboratory and Garden / W. E. B. // *Nature*. – 1935. – Vol. 136. – P. 890.
42. Михайленко И. М. Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных / И. М. Михайленко // *Сельскохозяйственная биология*. – 2007. – № 1. – С. 103–111.
43. Kozlowski T. T. The Physiological Ecology of Woody Plants / T. T. Kozlowski. – San Diego – New York – Boston – London – Sidney – Tokyo – Toronto: Academic Press, 1990. – 678 p.
44. Kozlowski T. T. Physiology of Woody Plants / T. T. Kozlowski, S. G. Pallardy. – San Diego – London – Boston – New York – Sidney – Tokyo – Toronto: Academic Press, 1996. – 411 p.
45. Keppler F. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions / F. Keppler, J. T. G. Hamilton, M. Brab, T. Röckmann // *Nature*. – 2006. – V. 439. – P. 187–191.
46. Мухин В. А. Выделение метана из древесины живых деревьев / В. А. Мухин, П. Ю. Воронин // *Физиология растений*. – 2011. – Т. 58, № 2. – С. 283–289.
47. Мухин В. А. Метаногенная активность в древесных растениях / В. А. Мухин, П. Ю. Воронин // *Физиология растений*. – 2009. – Т. 56. – С. 152–154.
48. Полесская О. Г. Растительная клетка и активные формы кислорода / О. Г. Полесская. – М.: Университет, 2007. – 140 с.
49. Groenigen K. J. Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO₂ / K. J. Groenigen, C. W. Osenberg, B. A. Hungate // *Nature*. – 2011. – V. 475. – P. 214–216.
50. Knohl A. Global change: Indirect feedbacks to rising CO₂ / A. Knohl, E. Veldkamp // *Nature*. – 2011. – Vol. 475. – P. 177–178.
51. Davidson E. A. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides / E. A. Davidson, M. Keller, H. E. Erickson, L. V. Verchot, E. Veldkamp // *BioScience*. – 2000. – Vol. 50. – P. 667–680.

52. Qaderi M. M. Methane emissions from six crop species exposed to three components of global climate change: temperature, ultraviolet-B radiation and water stress / M. M. Qaderi, D. M. Reid // *Physiologia Plantarum*. – 2009. – Vol. 137, No. 2. – P. 139–147.
53. Iglesias-Rodriguez M. D. Phytoplankton Calcification in a High-CO₂ World / M. D. Iglesias-Rodriguez, P. R. Halloran, R. E. M. Rickaby, I. R. Hall, E. Colmenero-Hidalgo, J. R. Gittins, D. H. Green, T. Tyrrell, S. J. Gibbs, P. von Dassow, E. Rehm, E. V. Armbrust, K. P. Boessenkool // *Science*. – 2008. – Vol. 320. – P. 336–340.
54. Beerling D. J. Plant science: The hidden cost of transpiration / D. J. Beerling, P. J. Franks // *Nature*. – 2010. – Vol. 464. – P. 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 / A. D. McKown, H. Cochard, L. Sack // *American Naturalist*. – 2010. – Vol. 175. – P. 447–460.
56. Brodrigg T. J. Leaf hydraulic evolution led a surge in leaf photosynthetic capacity during early angiosperm diversification / T. J. Brodrigg, T. S. Feild // *Ecology Letters*. – 2010. – Vol. 13. – P. 175–183.
57. Malone M. Continuous measurement of macronutrient ions in the transpiration stream of intact plants using the meadow spittlebug coupled with ion chromatography / M. Malone, M. Herron, M. A. Morales // *Plant Physiology*. – 2002. – Vol. 130, No. 3. – P. 1436–1442.
58. Monje O. Characterizing photosynthesis and transpiration of plant communities in controlled environments / O. Monje, B. Bugbee // *Acta Hort.* – 1996. – Vol. 40. – P. 123–128.
59. Liao Y. C. Relationship between lead uptake by lettuce and water-soluble low-molecular-weight organic acids in rhizosphere as influenced by transpiration / Y. C. Liao, S. W. Chang Chien, M. C. Wang, Y. Shen, K. Seshiah // *J. Agric. Food Chem.* – 2007. – Vol. 17, No. 55. – P. 8640–8649.
60. Liao Y. C. Effect of transpiration on Pb uptake by lettuce and on water soluble low molecular weight organic acids in rhizosphere / Y. C. Liao, S. W. Chien, M. C. Wang, Y. Shen, P. L. Hung, B. Das // *Chemosphere*. – 2006. – Vol. 65, No. 2. – P. 343–351.
61. Kolb B. *Static Headspace-Gas Chromatography: Theory and Practice* / B. Kolb, L. S. Ettre. – Hoboken: Wiley, 2006. – 350 p.
62. Jennings W. *Qualitative Analysis of Flavor and Fragrance Volatiles by Glass Capillary Gas Chromatography* / W. Jennings. – New York – London – Sydney – Toronto – San Francisco: Academic Press, 1980. – 472 p.
63. Heydanek M. G. Gas chromatography-mass spectroscopy investigations on the flavor chemistry of oat groats / M. G. Heydanek, R. J. McGorin // *J. Agric. Food Chem.* – 1981. – Vol. 29, No. 5. – P. 950–954.
64. Werkhoff P. *Vacuum Headspace Method in Aroma Research: Flavor Chemistry of Yellow Passion Fruits* / P. Werkhoff, M. Guntert, G. Krammer, H. Sommer, J. Kaulen // *J. Agric. Food Chem.* – 1998. – Vol. 46. – P. 1076–1093.
65. Tucker A. O. *The Encyclopedia of Herbs: A Comprehensive Reference to Herbs of Flavor and Fragrance* / A. O. Tucker, T. DeBaggio. – Portland – London: Timber Press, 2009. – 604 p.
66. Hui Y. H. *Handbook of Fruit and Vegetable Flavors* / Ed. by Y. H. Hui. – Hoboken: Wiley, 2010. – 1095 p.
67. Qian M. *Flavor and Health Benefits of Small Fruits (ACS Symposium Series)* / Ed. by M. Qian, A. Rimando. – Washington: American Chemical Society, 2010. – 336 p.
68. Li Q. Phytoncides (wood essential oils) induce human natural killer cell activity / Q. Li, A. Nakadai, H. Matsushima, Y. Miyazaki, A. M. Krensky, T. Kawada, K. Morimoto // *Immunopharmacol. Immunotoxicol.* – 2006. – Vol. 28, No. 2. – P. 319–333.
69. Дмитриев М. Т. Газохроматографическое определение фитонцидов в воздухе / Дмитриев М. Т., В. А. Мишихин, Е. В. Степанов // *Гигиена и санитария*. – М.: Медицина, 1983. – № 7. – С. 43–45.
70. Marsili R. *Flavor, Fragrance, and Odor Analysis* / Ed. by R. Marsili. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 280 p.
71. Berger R. G. *Flavours and Fragrances: Chemistry, Bioprocessing and Sustainability* / Ed. by R. G. Berger. – Berlin – Heidelberg – New York: Springer, 2007. – 664 p.
72. De Rovira D. *Dictionary of Flavors* / D. De Rovira. – Ames, Iowa: Wiley–Blackwell, 2004. – 736 p.
73. Wise P. M. Quantification of Odor Quality / P. M. Wise, M. J. Olsson, W. S. Cain // *Chemical Senses*. – 2000. – Vol. 25, No. 4. – P. 429–43.
74. Persaud K. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose / K. Persaud, G. Dodd // *Nature*. – 1982. – Vol. 299, No. 5881. – P. 352–355.
75. Jin H. J. Nanovesicle-based bioelectronic nose platform mimicking human olfactory signal transduction / H. J. Jin, S. H. Lee, T. H. Kim, J. Park, H. S. Song, T. H. Park, S. Hong // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2012. – Vol. 35, No. 1. – P. 335–341.
76. Röck F. *Electronic Nose: Current Status and Future Trends* / F. Röck, N. Barsan, U. Weimar // *Chemical Reviews*. – 2008. – Vol. 108, No. 2. – P. 705–725.
77. Degenhardt D. C. Temporal Dynamics and Electronic Nose Detection of Stink Bug-Induced Volatile Emissions from Cotton Bolls / D. C. Degenhardt, J. K. Greene, A. Khalilian // *Psyche*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1–9.
78. Li Q. A forest bathing trip increases human natural killer activity and expression of anti-cancer proteins in female subjects / Q. Li, K. Morimoto, M. Kobayashi, H. Inagaki, M. Katsumata, Y. Hirata, K. Hirata, T. Shimizu, Y. J. Li, Y. Wakayama, T. Kawada, T. Ohira, N. Takayama, T. Kagawa, Y. Miyazaki // *Journ. Biol. Regul. Homeost. Agents*. – 2008. – Vol. 22, No. 1. – P. 45–55.
79. Li Q. Visiting a forest, but not a city, increases human natural killer activity and expression of anti-cancer proteins / Q. Li, K. Morimoto, M. Kobayashi, H. Inagaki, M. Katsumata, Y. Hirata, K. Hirata, H. Suzuki, Y. J. Li, Y. Wakayama, T. Kawada, B. J. Park, T. Ohira, N. Matsui, T. Kagawa, Y. Miyazaki, A. M. Krensky // *Int. J. Immunopathol. Pharmacol.* – 2008. – Vol. 21, No. 1. – P. 117–27.

80. Lago J. H. G. Microclimatic Factors and Phenology Influences in the Chemical Composition of the Essential Oils from *Pittosporum undulatum* Vent. Leaves / J. H. G. Lago, O. A. Favero, P. Romoff // *Journ. Braz. Chem. Soc.* – 2006. – Vol. 17, No.7. – P. 1334–1338.
81. Schwarz J. Phenology of semiochemical-mediated host foraging by the western boxelder bug, *Boisea rubrolineata*, an aposematic seed predator / J. Schwarz, R. Gries, K. Hillier, N. Vickers, G. Gries // *J. Chem. Ecol.* – 2009. – Vol. 35, No. 1. – P. 58–70.
82. Puc M. The patterns of *Corylus* and *Alnus* pollen seasons and pollination periods in two Polish cities located in different climatic regions / M. Puc, I. Kasprzyk // *Aerobiologia.* – 2013. – Vol. 29, No. 4. – P. 495–511.
83. Fredrickson E. L. Volatile compounds on the leaf surface of intact and regrowth tarbush (*Flourensia cernua* DC) canopies / E. L. Fredrickson, R. E. Estell, M. D. Remmenga // *J. Chem. Ecol.* – 2007. – Vol. 33, No. 10. – P. 1867–1875.
84. Degn H. Gas Enzymology / Ed. by H. Degn, R. P. Cox, H. Toftlund. Proceedings of a Symposium held at Odense University, Denmark, 1984. – Dordrecht: Kluwer Acad. Pub., 1985. – 264 p.
85. Hanes J. M. Spring leaf phenology and the diurnal temperature range in a temperate maple forest / J. M. Hanes // *International Journal of Biometeorology.* – 2014. – Vo. 58, No 2. – P. 103–108.
86. Geider R. Algal Photosynthesis: The Measurement of Algal Gas Exchange / R. Geider. – Springer, 1992. – 256 p.
87. Maina J. N. The Gas Exchangers: Structure, Function, and Evolution of the Respiratory Processes / J. N. Maina. – Berlin: Springer, 1998. – 498 p.
88. Skogestad S. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design / S. Skogestad, I. Postlethwaite. – Chichester – New York – Brisbane – Toronto – Singapore: Wiley, 2005. – 592 p.
89. Todeschini R. Molecular Descriptors for Chemoinformatics (Methods and Principles in Medicinal Chemistry) / R. Todeschini, V. Consonni. – Weinheim: Wiley-VCH, 2009. – 1257 p.
90. Вершинин В. И. Компьютерная идентификация органических соединений / В. И. Вершинин, Б. Г. Дерендяев, К. С. Лебедев. – М.: Академкнига, 2002. – 197 с.
91. Hemmer M. C. Expert Systems in Chemistry Research / M. C. Hemmer. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 416 p.
92. Mitchell H. B. Multi-Sensor Data Fusion: An Introduction / H. B. Mitchell. – Berlin – Heidelberg: Springer, 2010. – 296 p.
93. Hall D. L. Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion / D. L. Hall, S. A. McMullen. – Boston – London: Artech House, 2004. – 466 p.
94. Raol J. R. Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB / J. R. Raol. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 568 p.
95. Bergann F. Untersuchungen über Lichtwachstum, Lichtkrümmung und Lichtabfall bei *Avena sativa* mit Hilfe monochromatischen Lichtes / F. Bergann // *Planta.* – 1930. – Vol. 10, No. 4. – P. 666–743.
96. Meron E. Nonlinear Physics of Ecosystems / E. Meron. – Boca Raton: CRC Press, 2013. – 350 p.
97. Botkin D. B. Forest Dynamics: An Ecological Model / D. B. Botkin. – Oxford – New York: Oxford University Press, 1993. – 328 p.
98. Buongiorno J. The Global Forest Products Model: Structure, Estimation, and Applications / J. Buongiorno, S. Zhu, D. Zhang, J. Turner, D. Tomberlin. – Amsterdam – Boston – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo: Academic Press, 2003. – 300 p.
99. Pretzsch H. Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model / H. Pretzsch. – Heidelberg – Dordrecht – London – New York: Springer, 2010. – 683 p.
100. Isermann R. Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications / R. Isermann, M. Münchhof. – Heidelberg – Dordrecht – London – New York: Springer, 2011. – 730 p.
101. Giantomassi A. Modeling estimation and identification of complex system dynamics: issues and solutions / A. Giantomassi. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012. – 136 p.
102. Nelles O. Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models / O. Nelles. – Berlin – Heidelberg – New York: Springer, 2001. – 785 p.
103. Barrat A. Dynamical Processes on Complex Networks / A. Barrat, M. Barthélemy, A. Vespignani. – Cambridge University Press, 2012. – 361 p.
104. Lee M. J. Designation for an Ecological Network using Remote Sensing: Focusing on the North-East Asia / M. J. Lee, S. W. Jeon, W. K. Song. – Lambert Academic Publishing, 2013. – 64 p.
105. Creswell J. W. Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches / J. W. Creswell. – Los Angeles – London – New Delhi – Singapore – Washington: SAGE Publications Inc., 2013. – 304 p.
106. Cserhati T. Multivariate Methods in Chromatography: A Practical Guide / T. Cserhati. – Hoboken – Chichester: Wiley, 2008. – 352 p.
107. Mager P. P. Multivariate Chemometrics in QSAR: A Dialogue / P. P. Mager. – New York – Chichester – Toronto – Brisbane – Singapore: Wiley, 1988. – 345 p.
108. Nendza M. Structure-Activity Relationships in Environmental Sciences / M. Nendza. – London: Chapman and Hall, 1998. – 288 p.
109. Bumble S. Computer Generated Physical Properties / S. Bumble. – Boca Raton: CRC Press, 1999. – 288 p.
110. Drosos J. C. Quantitative structure-retention relationships of polycyclic aromatic hydrocarbons gas-chromatographic retention indices / J. C. Drosos, M. Viola-Rhenals, R. Vivas-Reyes // *J. Chromatogr. A.* – 2010. – Vol. 1217, No. 26. – P. 4411–4421.
111. Jönsson S. Multivariate characterisation and quantitative structure-property relationship modelling of nitroaromatic compounds / S. Jönsson, L. A. Eriksson, B. van Bavel // *Anal. Chim. Acta.* – 2008. – Vol. 621, No. 2. – P. 155–162.
112. Du H. Quantitative Structure-Retention relationship study of the constituents of saffron aroma in SPME-GC-MS based on the projection pursuit regression method / H. Du, J. Wang, Z. Hu, X. Yao // *Talanta.* – 2008. – Vol. 77, No. 1. – P. 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 / Y. Tan, K. J. Siebert // *Journ. Food Sci.* – 2008. – Vol. 73, No. 1. – P. 56–63.
114. Hoffmann E. A. Theoretical characterization of gas–liquid chromatographic stationary phases with quantum chemical descriptors / E. A. Hoffmann, Z. A. Fekete, R. Rajkó, I. Pálkó, T. Körtvélyesi // *Journ. Chromatogr. A.* – 2009. – Vol. 1216, No. 12. – P. 2540–2547.
115. Rodriguez-Bachiller A. Expert Systems and Geographic Information Systems for Impact Assessment / A. Rodriguez-Bachiller, J. Glasson. – London – New York: Taylor & Francis, 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 / C. Warnock. – Cedar Fort, Inc. Springville, 2013. – 176 p.
117. Jones. H. G. Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology / H. G. Jones. – Cambridge – New York – Melbourne: Cambridge University Press, 1992. – 456 p.
118. Kottek M. World Map of the Köppen–Geiger climate classification updated / M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel // *Meteorol. Z.* – 2006. – Vol. 15, No. 3. – P. 259–263.
119. Peel M. C. Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification / M. C. Peel, B. L. Finlayson, T. A. McMahon // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2007. – Vol. 11. – P. 1633–1644.
120. Kalacska M. Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Sub-Tropical Forests / Ed. by M. Kalacska, G. A. Sanchez-Azofeifa. – Boca Raton – London – New York: CRC Press, 2008. – 352 p.
121. Thenkabail P. S. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation / Ed. by P. S. Thenkabail, J. G. Lyon, A. Huete. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 781 p.
122. Helt M. F. Vegetation Identification With LIDAR / M. F. Helt. – Thes. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2005. – 83 p.
123. Lavallo M. Remote Sensing of Vegetation by Polarimetric Space Interferometers: Models and Methods / M. Lavallo. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012. – 220 p.
124. Gitelson A. A. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves / A. A. Gitelson, Y. Gritz, M. N. Merzlyak // *Journ. Plant Physiol.* – 2003. – Vol. 160. – P. 271–282.
125. Biswal U. C. Chloroplast Biogenesis: From Proplastid to Gerontoplast / U. C. Biswal, B. Biswal, M. K. Raval. – Dordrecht – Boston – London: Kluwer Academic, 2003. – 380 p.
126. Mohammed G. H. Natural and stress-induced effects on leaf spectral reflectance in Ontario species / G. H. Mohammed, T. L. Noland, D. Irving, P. H. Sampson, P. J. Zarco-Tejada, J. R. Miller // *Forest Research Report.* – 2000. – No.156. – 34 p.
127. Dasgupta S. Remote Sensing of Vegetation Water and Fire Risk: Selected Research Topics / S. Dasgupta. – Saarbrücken: VDM, 2009. – 176 p.
128. Chen J.-C. Correlation Analysis Between Indices of Tree Leaf Spectral Reflectance and Chlorophyll Content / J.-C. Chen, C.-T. Chen // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* – 2008. – Vol. XXXVII., Part B7. – P. 231–238.
129. Sims D. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages / D. A. Sims, J. A. Gamon // *Remote Sensing of Environment.* – 2002. – Vol. 81. – P. 337 – 354.
130. Nooden L. D. Plant Cell Death Processes / Ed. by L. D. Nooden. – Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo: Academic Press, 2003. – 392 p.
131. Chang C.-I. Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis/ C.-I. Chang. - Hoboken: Wiley, 2013. – 1164 p.
132. Chang C.-I. Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification / C.-I. Chang. – New York: Kluwer Academic – Plenum Publishers. 2003. – 367 p.
133. Kim K. S. 3D Visualization of an Invariant Display Strategy for Hyperspectral Imagery / K. S. Kim // *Thes. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002.* – 67 p.
134. Beckett S. Introduction to Time Series using Stata / S. Beckett – Texas: Stata Press, 2013. – 741 p.
135. Gould W. Maximum Likelihood Estimation with Stata / W. Gould, J. Pitblado, B. Poi. – Texas: Stata Press, 2010. – 352 p.
136. Rabe-Hesketh S. Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata, Vol.1 / S. Rabe-Hesketh, A. Skrondal. – Texas: Stata Press, 2012. – 497 p.
137. Rabe-Hesketh S. Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata, Vol. 2 / S. Rabe-Hesketh, A. Skrondal. – Texas: Stata Press, 2012. – 477 p.
138. Acock A. C. Discovering Structural Equation Modeling Using Stata / A. C. Acock. – Texas: Stata Press, 2013. – 304 p.
139. Kohler U. Data Analysis Using Stata. / U. Kohler, F. Kreuter. – Texas: Stata Press, 2012. – 497 p.
140. Siddiqui K. J. Spectral pattern recognition: the methodology / K. J. Siddiqui, D. L. Eastwood, Y.-H. Liu // *SPIE Proceedings.* – 1999. – Vol. 3854. – P. 84–97.
141. Zachor A. S. Spectral pattern recognition in IR remote sensing / A. S. Zachor // *Applied Optics.* – 1983. – Vol. 22, No. 17. – P. 2699–2703.
142. Vollmer M. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications / M. Vollmer, K.-P. Möllmann. – Weinheim: Wiley–VCH, 2010. – 612 p.
143. Parida L. Pattern Discovery in Bioinformatics: Theory & Algorithms / L. Parida. – Boca Raton – London – New York: Chapman and Hall / CRC, 2007. – 512 p.
144. Shen J. 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: World Scientific Pub. Co Inc., 2001. – 130 p.

145. Ball G. H. *Isodata: a method of data analysis and pattern classification* / G. H. Ball, D. J. Hall. – California: Stanford Research Institute, 1965. – 79 p.
146. Cano-Casanova S. *Spectral Theory And Nonlinear Analysis With Applications to Spatial Ecology* / Ed. by S. Cano-Casanova, J. Lopez-Gomez, C. Mora-Corral. – New Jersey – London – Singapore – Beijing – Shanghai – Hong Kong – Taipei – Chennai: World Scientific Pub. Co Inc., 2005. – 276 p.
147. Jones H. G. *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications* / H. G. Jones, R. A. Vaughan. – Oxford – New York: Oxford University Press, 2010. – 400 p.

Градов О. В. Хромато-ауксанометрия и хромато-масс-ауксанометрия в фенологическом стадийном мониторинге лесных пород на основе флейво- и газохимических принципов с автоматической динамической идентификацией паттернов (таксономических, метеоролого-климатических и феноспектральных) // Экосистемы, их оптимизация та охорона. Сімферополь: ТНУ, 2014. Вип. 10. С. 30–45.

В настоящей работе предложена принципиально отличная от известных в ботанической и лесотехнической практике ауксанометрическая система, которая, являясь системой многовидового стадийного мониторинга: I) 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, II) в ходе работы в различных режимах посредством обучения распознаванию образов с пополнением базы данных 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, то есть 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, III) при феноспектральной экспериментальной выгонке позволяет программировать и с помощью обратной связи регулировать температуру, четко прогнозируя подобным путем 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 (если известно, например, что для клена (*Acer*) сумма эффективных температур – 156,2 °С, а для липы (*Tilia*) – 739 °С, то очевидно, что в термическом ранжировании в базе данных липа будет стоять позднее клена), IV) автоматически классифицировать 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), 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, то есть: сами параметры, регистрируемые детектирующей частью установки, могут представлять собой сигнал для изменения режима ее функционирования. Данная статья описывает не метод (поскольку внедряемая технология базируется на известных методах – таких как хроматография, спектроскопия и т.д.), а подход, применения которого не ограничиваются отдельными моделями или типами оборудования и системной сложностью условий среды.

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

Gradov O. V. Chromatographic auxanometry and GC-MS-auxanometry in forest plant species vegetation phenological monitoring based on flavor and gas chemistry principles with automatic pattern recognition (climatic, meteorological, taxonomic and phenospectral) // Optimization and Protection of Ecosystems. Simferopol: TNU, 2014. Iss. 10. P. 30–45.

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. I) Unlike the quantitative approach in standard auxanometric measurement techniques with the shoot elongation being the only criterion of the plant growth, 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, which allows the feedback analysis between the plant growth / development and the environmental parameter variation. II) 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 allows parameter variation in the course of the germination / elongation process monitoring as needed (if this 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. III) In the case of experimental phenological spectral plant germination / elongation with the system described 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). IV) Due to this fact the auxanometric system described 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 system approach described operates in a wide range of conditions and possess a number of different application fields, so it is worth being recommended for implementation in both field and laboratory practice of forest engineering.

Key words: phenospectral monitoring, pheno-spectral library, auxanometer, crescograph, oscillating plate phytograph, GC-MS, mass spectrometry, chromatography, gas chemistry, flavor chemistry, optical spectroscopy, UV-NIR mapping & monitoring.

Поступила в редакцію 12.01.2014 з.