МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

А.М. ПОЛЬОВИЙ

МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В АГРОМЕТЕОРОЛОГІЇ

ОДЕСА, 2002

Навчальне видання

ПОЛЬОВИЙ АНАТОЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В АГРОМЕТЕОРОЛОГІЇ

УДК

Польовий А.М.

Реферат

Рецензенти:
М.І. Кульбіда, директор Українського Гідрометеорологічного ценру
В.Я. Щербаков, зав. кафедрою рослинництва Одеського сільськогосподарського інституту, доктор сільськогосподарських наук, професор

Одеський державний екологічний університет

Світлій пам'яті мого друга та колеги
Віктора Миколайовича Страшного,
який понад 25 років очолював та розвивав вітчизняні агрометеорологічні дослідження, присвячую.

Автор

ПЕРЕДМОВА

Вивчення закономірностей формування метеорологічного режиму в рослинному покриві та впливу факторів навколишнього середовища на життєдіяльність культурних рослин являється однією з головних проблем сільськогосподарської метеорології. В основі вирішення цієї проблеми лежить виконання як стандартних агрометеорологічних спостережень на мережі агро- та гідрометеорологічних станцій, так і різнопланових експериментальних досліджень, за допомогою яких отримується та первинна інформація, що становить фундамент сучасних теоретичних та прикладних агрометеорологічних досліджень. На відміну від стандартних спостережень, що виконуються на органогенному та організменному рівні, експериментальні дослідження охоплюють широке коло питань про вивчення впливу агрометеорологічних умов на ріст, розвиток та формування врожайності сільськогосподарських культур, а самі дослідження ведуться від клітинного рівня до рівня окремої агроекосистеми.

Вони широко використовуються при дослідженнях радіаційного, водного-теплового, турбулентного режиму рослинного покриву, режиму CO_2 та режиму мінерального живлення рослин, математичному моделюванню продуційного процесу рослин, розробці методів агрометеорологічних розрахунків та прогнозів, оцінці реакції рослин, в особливості в сортовому розрізі, на вплив погодних умов. Значний інтерес складає вивчення реакції на екстремальні умови, оцінка посухостійкості, зимостійкості, заморозкостійкості рослин, агрометеорологічне обгрунтування агротехніки вирощування сільськогосподарських культур та програмування врожаїв.

Розвиток різноманітних експериментальних агрометеорологічних досліджень та велика кількість публікацій, що містять їх результати,

дозволили підійти до створення учбового посібника. В посібник ввійшли результати таких досліджень, які достатньо обгрунтовані, загальновизнані та відрізняються комплексністю. Вони надають повну інформацію про існуючі експериментальні методи вивчення системи "грунт-рослина-атмосфера". В посібнику приводиться список літератури, що була використана при його підготовці.

Автор висловлює подяку Л.І. Польовій за розуміння, схвалення та активну допомогу на всіх етапах підготовки посібника: від обговорення його структури і змісту до комп'ютерного набору рукопису та оформлення ілюстрацій, подяку Т.М. Зайцевій та О.А. Барсуковій за підготовку матеріалів для рукопису.

ВСТУП

Фотосинтез є матеріальною й енергетичною базою еволюційного процесу і являється одною із найважливіших проблем сучасного природознавства. Це єдиний процес, що протікає на всій планеті, який йде проти падіння енергетичного потенціалу з консервацією колосальної кількості сонячної енергії в продуктах рослинного походження, завдяки котрим можливе існування різноманітних форм життя на Землі. Життєдіяльність рослин не тільки тісно пов'язана з навколишнім середовищем, але і самі рослини суттєво впливають на навколишнє середовище шляхом впливу на склад атмосфери, температуру, вологість повітря і грунту та ін.

Інтенсивність фотосинтетичної діяльності посіву визначається рядом зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на агробіоценоз як систему.

Зовнішні (екзогенні) фактори, ці фактори не входять до складу агробіоценозу, але вони мають вирішальний вплив на його утворювання і розвиток. До них відносяться – прихід сонячної радіації, температура і вологість повітря, вміст CO_2 в повітрі над посівом, швидкість вітру, кількість опадів, родючість грунтів та ін.

Внутрішні (ендогенні) фактори властиві самому агробіоценозу. Їх можна розділити на дві групи: *біологічні властивості рослин*, що включають комплекс особливостей рослин на клітинному рівні (структура і вміст хлоропластів, продиховий апарат і т. д.) і на рівні окремого органу рослини (кількість листя, співвідношення надземної і підземної частини рослин та ін.) та *архітектоніку посіву*, що включає його склад, побудову і властивості середовища, які входять до складу системи, зв'язаної з рослинним покривом зворотніми стосунками (радіаційний режим і фітоклімат посівів, волого-температурний режим шару грунту, де розташована коренева система, грунтова родючість).

Частина факторів зовнішнього середовища приймає безпосередню участь у енерго- і масообміні (сонячна радіація, вміст CO_2, атмосферна та грунтова вода, мінеральні речовини), а інші є фоном і визначають умови проходження біологічних реакцій у рослинах (температура повітря, вітер, атмосферні явища та ін.).

Добова динаміка процесів життєдіяльності рослинності багато в чому визначається температурою і вологістю грунту і повітря міжлисткового простору, а також прилеглого до рослинності приземного шару повітря. З іншого боку, і рослинність накладає певний вплив на ці характеристики. У рослинному покриві формується свій

гідрометеорологічний режим як результат взаємодії рослин, фізичних тіл, середовища та продуктів їх життєдіяльності.

Дослідження гідрометеорологічного режиму середовища життєдіяльності рослин диктується необхідністю пошуку прийомів його оптимізації за допомогою зміни структури посіву і проведення спеціальних агротехнічних заходів, наприклад, по зменшенню випаровування з грунту, у боротьбі із заморозками; кінцевою метою таких досліджень повинні бути заходи направлені на розробку практичних рекомендацій по оперативному управлінню продуційним процесом.

Істотно впливають на продуційний процес та формування врожаю компоненти агробіоценозу, що складають разом із культурним видом рослин єдину систему. Це – бур'яни, корисні і шкідливі комахи, мікроорганізми та ін.

Вивчення формування гідрометеорологічного режиму в агробіоценозі, оцінка характеристик стану грунтово-рослинного покриву, дослідження ефекту впливу факторів зовнішнього середовища на ріст, розвиток та формування врожаю складають предмет та основні задачі експериментальних досліджень рослинного покриву (РП).

Поняття про агроекосистему і систему "грунт – рослина – атмосфера". Екологічна система являє собою об'єкт, що складається з десятків, а нерідко з багатьох сотень видів організмів, наділених здібністю до накопичення і багаторазового використання енергії і речовини, з великою кількістю механізмів, підтримуючих цілісність його структури в умовах середовища, що змінюються

При направленому антропогенному впливі природні екосистеми руйнуються і на їх місці створюються штучні екологічні системи – агроекосистеми.

Агроекосистемою називається спеціальний вид екосистеми – екологічна система сільськогосподарського поля, на якому ростуть культурні рослини, знаходяться інші види рослин і тварин і відбувається складна низка фізичних і біогеохімічних трансформацій енергії і речовини.

На відміну від природних екологічних систем, які характеризуються повною пристосованістю і саморегуляцією і забезпечують стійкий рівноважний стан – протективні екосистеми, то у агроекосистемах саморегуляція багато в чому порушена. Вони нестабільні. У агроекологічних системах розірвана більшість зворотних зв'язків, порушений природний обмін, що повторюється з року в рікенергією і речовиною на різних трофічних рівнях.

Фітоценоз агроекосистеми не може самовідновлюватися, для цього необхідна антропогенна діяльність. Біотична частина агроекосистеми містить весь копмлекс, характерний для будь-яких надземних систем:

продуценти, консументи і редуценти.

Разом з популяціями живих організмів різних видів в склад агроекосистеми входять певні абіотичні компоненти, пов'язані з біотичними компонентами, а також із зовнішніми чинниками різноманітними зв'язками, які нарівні з біотичними компонентами утворюють структуру агроекосистеми і грають важливу роль в функціонуванні її як цілого.

Абіотична частина системи – *середовище життєдіяльності рослин і тварин* – використовується ними як «життєвий простір» і як джерело енергії і мінеральних елементів.

Сукупність рослин одночасно знаходиться в двох середовищах: в приземному шарі атмосфери та верхніх шарах літосфери і активно взаємодіє з ними.

З неорганічних сполучень, що поступають із зовнішнього середовища, рослина синтезує вуглеводи і інші багаті хімічною енергією органічні речовини. Надходження енергії і речовин здійснюється шляхом «крайових процесів», що протікають на межі рослини з фізичним середовищем. Так, процес фотосинтезу відбувається в листях, стеблах і репродуктивних органах, що формуються, тобто на межі рослини і атмосфери, а надходження води і мінеральних речовин здійснюється через мережу кореневої системи і грунту. Процеси обміну між середовищем і рослинами, що відбуваються в фітоелементах і кореневій системі, функціонально нероздільні, вони можуть відбуватися тільки одночасно. Зв'язок між ними забезпечує складна сукупність процесів перенесення всередині рослини (вуглецевий і водний обмін рослин, обмін мінеральних речовин).

Склад і режим повітряного і грунтового середовищ життєдіяльності рослин, знаходячись під безпосереднім і визначальним впливом внутрішніх компонентів агроекосистеми, передусім рослинності, зазнає сильного впливу зовнішніх атмосферних і грунтових процесів. Здійснюючи крайові обмінні процеси, фітоценоз змінює повітряне і грунтове середовище своєї життєдіяльності, пом'якшуючи в якійсь мірі різкі коливання зовнішніх умов.

У повітряному середовищі ці зміни охоплюють наступні процеси: перенесення сонячної радіації в рослинному покриві, її поглинання і розсіяння фітоелементами, – поглинання і відбиття сонячної радіації грунтом, ослаблення швидкості вітру і зміна характеристик атмосферної турбулентності в шарах повітря над рослинним покривом і всередині нього, конвективне перенесення тепла в шарах повітря над рослинним покривом і всередині нього, виділення водяної пари з грунту (випаровування) і фітоелементів (транспірація) і його перенесення в повітрі. Під впливом цих процесів формуються температурні режими

грунту і рослинності. Разом з тепловим випромінюванням атмосфери вони зумовлюють перенесення теплового випромінювання в шарах повітря над рослинним покривом і всередині нього. Процеси фотосинтезу і дихання рослинного покриву визначають режим вуглекислого газу, що охоплює виділення CO_2 з грунту, його перенесення в повітрі і поглинання (вдень) або виділення (вночі) рослинами. Протилежно перенесенню CO_2 йде перенесення кисню та його поглинання грунтом і виділення (вдень) або поглинання (вночі) рослинами.

Грунтове середовище є свого роду фокусом агроекосистеми, оскільки воно зв'язане з усіма іншими її компонентами, причому підтримка цих зв'язків має життєво важливе значення для функціонування всієї агроекосистеми. Її властивості доцільно розбити на дві групи.

Перша група включає відносно консервативні властивості, які, хоч і різні в грунтах різних агроекосистем, але в кожному конкретному типі грунту змінюються порівняно мало, відображаючи початкові умови формування і сучасний комплекс екологічних чинників в даній агроекосистемі. Це основні фізичні і хімічні властивості грунтової маси (щільність, пористість, механічний склад, валовий хімічний склад, вміст гумусу і азоту, кислотність, місткість катіонного обміну), а також біомаса і розподіл живих організмів.

Другу групу властивостей грунту утворюють досить мінливі характеристики грунтового профілю, які визначаються процесами взаємодії грунту з атмосферою і рослинним покривом. Під впливом цих процесів формується тепловий, водний і повітряний режим грунту, вміст в грунті елементів мінерального живлення.

Вся система "грунт – рослина – атмосфера" ділиться на 6 горизонтальних шарів (рис. В.1). По вертикалі від поверхні грунту до верхньої границі рослинності $h_o(t)$ *і* до нижньої границі поширення коріння $r_o(t)$ *виділяється* внутрішнє середовище – невід'ємна складова частина агроекосистеми. Це відповідно атмосферне і грунтове середовище агроекосистеми. До них примикають перехідні, буферні зони, в яких елементи фітомаси відсутні, але фізичні характеристики цих зон завдяки процесам обміну зберігають деяку залежність від культурного фітоценозу *(агроценозу).*

Властивості внутрішнього атмосферного і грунтового середовища агроекосистеми, що охоплюють приземный шар атмосфери і верхні шари грунту визначаються процесами взаємодії з іншими компонентами агроекосистеми (теплообмін, вологообмін, фотосинтез, дихання та ін.) На відміну від них властивості зовнішнього середовища агроекосистеми ($z > H_i$ *і* $z < R_i$) формуються під впливом процесів іншого, більш великого масштабу, незалежних від впливу агроекосистеми: атмосферних процесів і процесів, що протікають у підстильній породі.

Межа зовнішнього і внутрішнього середовища агроекосистеми вельми рухлива у часі і в просторі, вона визначається ростом і розвитком агрофітоценозу. У залежності від вигляду агрофітоценозу і фази його розвитку, межа атмосферного і грунтового середовища агроекосистеми може коливатися від декількох десятків сантиметрів до декількох метрів. Для системи "грунт – рослина – атмосфера" характерні такі особливості, як висока складність, цілісність, динамічність, здатність до саморегулювання і адаптації.

*Загальна методологія досліджень.*У сучасних умовах бурхливого розвитку науково-технічного прогресу, інтенсивного збільшення обсягу наукової і науково-технічної інформації, швидкої зміни і оновлення знань особливе значення має підготовка у вищій школі висококваліфікованих фахівців, що мають високу загальнонаукову і професійну підготовку, здібних до самостійної творчої роботи, до впровадження у виробничий процес новітніх і прогресивних результатів.

Наука – сфера дослідницької діяльності, яка направлена на отримання нових знань про природу, суспільство і мислення. У даний час розвиток науки пов'язаний з розділенням і кооперацією наукової праці, створенням наукових установ, експериментального і лабораторного обладнання.

Сучасне суспільство у його елементах і у всіх видах його діяльності пронизане впливом науки і техніки. У наші дні наука стає в більшій мірі продуктивною силою суспільства.

Наукове знання – ідеальне відтворення в язиковій формі узагальнених уявлень про закономірні зв'язки об'єктивного світу. Знання є продуктом діяльності людей, направленої на перетворення дійсності. Процес руху людської думки від незнання до знання називають *пізнанням*, в основі якого лежить відображення об'єктивної дійсності в свідомості людини в процесі його суспільної, виробничої і наукової діяльності, що іменується *практикою*. Потреби практики виступають основною вирішальною силою розвитку пізнання, його *метою*.

Пізнання виростає з практики, але потім воно саме спрямовується на практичне оволодіння дійсністю. Від практики до теорії і від теорії до практики, від дії до думки і від думки до дійсності – така загальна закономірність відносин людини з навколишнім середовищем.

Практика є початком, вихідним пунктом і одночасно природним завершенням всякого процесу пізнання. Потрібно зазначити, що завершення пізнання завжди відносне, оскільки в процесі пізнання, як правило, виникають нові проблеми і нові задачі, які були підготовлені і поставлені попереднім розвитком наукової думки. Вирішуючи ці задачі і проблеми, наука повинна випереджати практику і таким чином свідомо направляти її розвиток.

Вся наука, все людське пізнання направлені до досягнення *істинних знань*, що вірно відображають дійсність. Тільки істинне наукове знання служить людині могутньою зброєю перетворення дійсності, дозволяє прогнозувати її подальший розвиток. У протилежність істинному знанню, *помилка* являє собою невірне, ілюзорне відображення світу.

Істинні знання існують у вигляді законів науки, теоретичних положень і висновків, вчень, підтверджених практикою та існуючих об'єктивно, незалежно від праць і відкриття вчених. Тому істинне наукове знання об'єктивне. Разом з тим, наукове знання може бути відносним і абсолютним. *Відносне знання* – це знання, яке, будучи в основному вірним відображенням дійсності, відрізняється деякою неповнотою збігу образу з об'єктом. *Абсолютне знання* – це повне, вичерпне відтворення узагальнених уявлень про об'єкт, який забезпечує абсолютний збіг образу з об'єктом. Абсолютне знання не може бути спростоване або змінене в майбутньому.

Парадигма – поняття, що використовується для опису різних етапів наукового знання, коли не існує теорія, визнана науковим співтовариством.

Мислення – це опосередковане і узагальнене відображення в мозку людини істотних властивостей, причинних відносин і закономірних зв'язків між об'єктами і явищами. Опосередкований характер мислення полягає в тому, що людина через доступні органам почуттів властивості, зв'язку і відносин предметів проникає в приховані властивості, зв'язки, відносини. Людина пізнає дійсність не тільки внаслідок свого особистого досвіду, але і непрямим шляхом, засвоюючи її в процесі спілкування з іншими людьми. Мислення нерозривно пов'язане з мовою і не може здійснюватися поза нею. Дійсно, основний інструмент мислення – логічні міркування людини, структурними елементами яких є поняття, думки, умовиводи.

Поняття – це думка, що відображає істотні і необхідні ознаки предмета або явища. Поняття можуть бути загальними, одиничними, збірними, абстрактними і конкретними, абсолютними і відносними. *Загальні поняття* пов'язані не з одним, а з безліччю предметів. Найбільш широкі поняття називаються *категоріями* і до них відносять деякі філософські поняття (про форму і зміст явищ), політекономії (товар, вартість). О*диничні поняття* відносяться завжди тільки до одного певного предмета. Під *збірними* маються на увазі поняття, які вказують на цілі групи однорідних предметів, що являють собою відому єдність, закінчену сукупність. *Поняття конкретні* відносяться до конкретних предметів. *Абстрактні поняття* відносяться до окремо взятих ознак цих предметів, наприклад "білі предмети". Особливістю *відносних понять* є те, що вони завжди мисляться попарно. *Абсолютними* називаються такі поняття, які не

мають парних відносин.

По ознаці відносин між поняттями їх ділять на тотожні, рівнозначні, підлеглі, супідрядні частково згідні, суперечливі і протилежні. *Тотожними* називають такі поняття, які мають однаковий зміст. Це одні і ті ж поняття, тільки виражені в різній словесній формі. *Рівнозначні поняття* мають один і той же обсяг, але відрізняються за змістом. Розкриття змісту поняття називають його *визначенням.* Останнє повинно відповідати двом найважливішим ознакам: 1) визначення повинно вказувати на найближче родове поняття; 2) визначення повинно вказувати на те, що дане поняття відрізняється від інших понять.

Розвиток наукових знань примушує уточнювати визначення понять, вносити нові ознаки в його зміст. При цьому поняття узагальнюється або обмежується. У науковому дослідженні визначення звичайно завершують процес дослідження, закріпляють ті результати, до яких вчений прийшов в своєму дослідженні.

Міркування – це думка, в якій за допомогою зв'язку понять утверджується або заперечується що-небудь. У мові міркування виражається у вигляді пропозиції. Міркування – це складання понять, що встановлюють об'єктивний зв'язок між можливими предметами і їх ознаками або між предметом і класом предметів.

Умовивід – процес мислення, що сполучає послідовність двох або декількох міркувань, внаслідок яких виводиться нове міркування. Часто умовивід називають *висновком*, через який стає можливим перехід від мислення до дії, практики. Умовиводи діляться на дві категорії: дедуктивні і індуктивні. Дедуктивні *умовиводи являють* собою виведення окремого випадку з якого-небудь загального положення. У індуктивних *умовиводах* на основі часткових випадків приходять до загального положення. Умовиводи поділяються також на безпосередні і опосередковані. У безпосередніх *умовиводах* від одного міркування приходять до іншого. У опосередкованих *умовиводах перехід* від одного міркування до іншого здійснюється через посередництво третього.

У процесі наукового дослідження можна відмітити наступні етапи: виникнення ідей; формування понять, міркувань; висунення гіпотез; узагальнення наукових чинників; доказ правильності гіпотез і міркувань.

Наукова ідея – інтуїтивне пояснення явища без проміжної аргументації, без усвідомлення всієї сукупності зв'язків, на основі якої робиться висновок. Вона базується на вже існуючому знанні, але розкриває раніше не помічені закономірності. Свою специфічну матеріалізацію ідея знаходить в гіпотезі.

Гіпотеза – це припущення про причину, яка викликає дане слідство. Якщо гіпотеза узгоджується чинниками, що спостерігаються, то в науці її називають *теорією* або *законом.* У процесі пізнання кожна гіпотеза зазнає

перевірки, внаслідок якої встановлюється, що слідства, які витікають з гіпотези, дійсно співпадають з спостерігаємими явищами, і що дана гіпотеза не суперечить ніяким іншим гіпотезам, які вважаються вже доведеними. Потрібно мати на увазі, що для підтвердження правильності гіпотези необхідно пересвідчитися не тільки в тому, що вона не суперечить дійсності, але і в тому, що вона є єдино можливою і з її допомогою вся сукупність явищ, що спостерігаються, знаходить собі цілком достатнє пояснення.

З накопиченням нових фактів одна гіпотеза може бути замінена іншою лише в тому випадку, якщо ці нові факти не можуть бути пояснені старою гіпотезою або їй суперечать. При цьому стара гіпотеза не викидається цілком, а тільки виправляється і уточнюється. По мірі уточнення і виправлення гіпотеза перетворюється в закон.

Закон – внутрішній істотний зв'язок явищ, що зумовлює їх необхідний закономірний розвиток. Закон виражає певний стійкий зв'язок між явищами або властивостями матеріальних об'єктів. Закон, знайдений шляхом здогадки, повинен бути потім логічно доведений, тільки тоді він признається наукою. Для доказу закону наука використовує міркування, які були раніше визнані істинними і з яких логічно слідує доведене міркування. У рідких випадках в рівній мірі виявляються доказовими суперечливі думки. У таких випадках кажуть про виникнення парадокса в науці, що завжди свідчить про наявність помилок в логіці доказу або неспроможності початкових думок в даній системі знань.

Парадокс в широкому значенні – це твердження, що різко розходиться із загальноприйнятою, установленою думкою, заперечення того, що представляється "безумовно правильним". *Парадокс у вузькому значенні* – це два протилежних твердження, для кожного з яких є ті, що представляються переконливими аргументами. Внаслідок опрацювання і зіставлення з дійсністю наукова гіпотеза може стати теорією.

Теорія (від латинського theoreo – розглядаю) – система узагальненого знання, пояснення тих або інших сторін дійсності. Теорія є духовним, уявним відображенням і відтворенням реальної дійсності. Вона виникає внаслідок узагальнення пізнавальної діяльності і практики. Структуру теорії формують принципи, аксіоми, закони, думки, положення, поняття, категорії і факти.

Під *принципом* в науковій теорії розуміється саме абстрактне визначення ідеї (початкова форма систематизації знань). *Принцип* – це правило, що виникло внаслідок суб'єктивно осмисленого досвіду людей. Початкові положення наукової теорії називаються постулатами або аксіомами.

Аксіома (постулат) – це положення, яке береться як вихідне, недоказове в даній теорії, і з якого виводяться всі інші припущення і

виведення теорії за наперед фіксованими правилами. Аксіоми очевидні без доказу. Рух думки від незнання до знання керується методологією.

Методологія – це філософське вчення про методи пізнання і перетворення дійсності, застосування принципів світогляду до процесу пізнання, духовної творчості і практики.

Метод – це спосіб досягнення мети. Метод об'єднує суб'єктивні і об'єктивні моменти пізнання. Метод об'єктивний, оскільки в теорії, що розробляється, дозволяє відображати дійсність і її взаємозв'язки. Таким чином, метод є програмою побудови і практичного застосування теорії. Одночасно метод суб'єктивний, оскільки є знаряддям мислення дослідника і включає в себе його суб'єктивні особливості. З філософської точки зору методи можна розділити на:

– *загальні,* діючі у всіх областях науки і на всіх етапах досліджень;

– *загальнонаукові,* для всіх наук;

– *частинні,* для певних наук;

– *спеціальні або специфічні* для даної науки.

Таке розділення методів завжди умовне, оскільки по мірі розвитку пізнання один науковий метод може перейти з однієї категорії в іншу. До загальнонаукових методів відносяться: спостереження, порівняння, рахунок, вимірювання. експеримент, узагальнення, абстрагування, формалізація, аналіз і синтез, індукція і дедукція, аналогія, моделювання, ідеалізація, ранжирування, а також *аксіоматичний, гіпотетичний, історичний і системний методи.*

Спостереження – це спосіб пізнання об'єктивного світу, заснований на безпосередньому сприйнятті предметів і явищ за допомогою органів почуттів без втручання в процес з боку дослідника.

Порівняння – це встановлення відмінності між об'єктами матеріального світу або знаходження в них загального, виконаного як за допомогою органів почуттів, так і за допомогою спеціальних пристроїв.

Рахунок – це знаходження числа, що визначає кількісне співвідношення однотипних об'єктів або їх параметрів, що характеризують ті або інші властивості.

Вимірювання – це фізичний процес визначення чисельного значення деякої величини шляхом порівняння її з еталоном.

Експеримент – одна з сфер людської практики, в якій зазнає перевірки істинність гіпотез, що висуваються або виявляються закономірності об'єктивного світу. У процесі експерименту дослідник втручається в процес, що вивчається, з метою пізнання, при цьому одні умови досвіду ізолюються, інші виключаються, треті посилюються або ослабляються. Експериментальне вивчення об'єкта або явища має певні переваги в порівнянні з спостереженням, оскільки дозволяє вивчати явища в "чистому вигляді" за допомогою усунення побічних чинників. При

необхідності дослідження можуть повторюватися і організовуватися так, щоб дослідити окремі властивості об'єкта, а не сукупність.

Узагальнення – визначення загального поняття, в якому знаходить відображення головне, основне, що характеризує об'єкти даного класу. Це засіб для утворення нових наукових понять, формулювання законів і теорій.

Абстрагування – це мислене відхилення від неістотних властивостей, зв'язків, відносин, предметів і виділення кількох сторін, що цікавлять дослідника. Воно здійснюється, як правило, в два етапи. На першому етапі визначаються неістотні властивості, зв'язки і т. д. На другому етапі об'єкт, що досліджується, замінюють іншим, більш простим, що являє собою спрощену модель, яка зберігає головне в складному.

Формалізація – відображення об'єкта або явища в знаковій формі якої-небудь штучної мови (математики, фізики, хімії і т.п.) та забезпечення можливості дослідження реальних об'єктів і їх властивостей через формальне дослідження відповідних знаків.

Аксіоматичний метод – спосіб побудови наукової теорії, при якому деякі твердження (аксіоми) приймаються без доказів і потім використовуються для отримання інших знань за певними логічними правилами.

Аналіз – метод пізнання за допомогою розчленування або розділення предметів дослідження (об'єктів, властивостей і т.п.) на складові частини. У зв'язку з цим аналіз складає основу аналітичного методу досліджень.

Синтез – з'єднання окремих сторін предмета в єдине ціле. Аналіз і синтез взаємопов'язані, вони являють собою єдність протилежностей.

Розрізнюють наступні види аналізу і синтезу:

– прямий або емпіричний метод, який використовують для виділення окремих частин об'єкта, виявлення його властивостей, найпростіших вимірювань;

– зворотний або елементарно-теоретичний метод, що базується на уявленнях про причинно-слідчі зв'язки різних явищ;

– структурно-генетичний метод, що включає вичленення в складному явищі таких елементів, які впливають вирішальним чином на всі інші сторони об'єкта.

Важливими поняттями в теорії пізнання є: *індукція* – умовивід від фактів до деякої гіпотези і *дедукція* – умовивід, в якому висновок про деякий елемент множини робиться на основі знання загальних властивостей всієї множини. Таким чином, дедукція і індукція – взаємозворотні методи пізнання, які широко використовують частинні методи формальної логіки. Це методи єдиної схожості, єдиної відмінності, супутніх змін, залишків.

Одним з методів наукового пізнання є *аналогія,* за допомогою якої

досягається знання про предмети і явища на основі того, що вони мають схожість з іншими. Міра імовірності (достовірність) умовиводів аналогічно залежить від кількості схожих ознак у явищ, що порівнюються (чим їх більше, тим більшу імовірність має висновок). Аналогія тісно пов'язана з моделюванням або модельним експериментом. Якщо звичайний експеримент безпосередньо взаємодіє з об'єктом дослідження, то в моделюванні такої взаємодії немає, оскільки експеримент проводиться не з самим об'єктом, а з його замінником.

Гіпотетичний метод пізнання передбачає розробку наукової гіпотези на основі вивчення фізичної, хімічної, біологічної і т.п. суті явища, що досліджується, за допомогою описаних вище способів пізнання і потім формулювання гіпотези, складання розрахункової схеми алгоритму (моделі), її вивчення, аналіз, розробка теоретичних положень.

Як в соціально-економічних науках і гуманітарних, так і в природних і технічних дослідженнях часто використовують *історичний метод пізнання.* Цей метод передбачає дослідження виникнення, формування і розвитку об'єктів в хронологічній послідовності, внаслідок чого дослідник отримує додаткові знання про об'єкт (явище), що вивчається, в процесі їх розвитку. При гіпотетичному методі пізнання дослідник нерідко вдається до ідеалізації.

Ідеалізація – це уявне конструювання об'єктів, які практично нездійсненні. Внаслідок ідеалізації реальні об'єкти позбавляються деяких характерних їм властивостей і наділяються гіпотетичними властивостями.

При дослідженні складних систем з різноманітними зв'язками, що характеризуються як безперервністю і детермінованістю, так і дискретністю і випадковістю, використовуються *системні методи* (дослідження операцій, теорія масового обслуговування, теорія управління, теорія множин і т.д.). У даний час такі методи набули широкого поширення в зв'язку з розвитком ЕОМ.

Різноманітні методи наукового пізнання умовно поділяються на ряд рівнів*: емпіричний, експериментально-теоретичний, теоретичний і метатеоретичний*.

До методів *емпіричного рівня* відносяться: спостереження, порівняння, рахунок, вимірювання, анкетний опит, співбесіда, тести, метод проб і помилок і т. д. Методи цієї групи конкретно пов'язані з явищами, що вивчаються, і використовуються на етапі формування наукової гіпотези.

Методи *експериментально-теоретичного рівня:* експеримент, аналіз і синтез, індукція і дедукція, моделювання, гіпотетичний, історичний і логічний методи. Ці методи допомагають досліднику виявити ті або інші достовірні факти, об'єктивні вияви в протіканні процесів, що досліджуються.

Методи *теоретичного рівня:* абстрагування, ідеалізація, формалізація, аналіз і синтез, індукція і дедукція, аксіоматика, узагальнення і т. д. На теоретичному рівні проводяться логічні дослідження зібраних чинників, вироблення понять, думок, робляться умовиводи. У процесі цієї роботи співвідносяться ранні наукові уявлення з виникаючими новими. На теоретичному рівні наукове мислення звільняється від емпіричного описування, створює теоретичні узагальнення. Таким чином, новий теоретичний зміст знань надбудовується над емпіричними знаннями.

До методів *метатеоретического рівня* відносять діалектичний метод і метод системного аналізу. За допомогою цих методів досліджуються самі теорії і розробляються шляхи їх побудови, вивчається система положень і понять даної теорії, встановлюються границі її застосування, способи введення нових понять, знаходяться шляхи синтезування декількох теорій. Центральною задачею даного рівня досліджень є пізнання умов формалізації наукових теорій і вироблення формалізованих мов, що іменуються метаязиками.

При вивченні складних, взаємопов'язаних один з одним проблем використовується *системний аналіз,* що отримав широке застосування в різних сферах наукової діяльності людини. У основі системного аналізу лежить поняття системи, під якою розуміється безліч об'єктів (компонентів), що характеризуються певними властивостями з фіксованими між ними відносинами. На базі цього поняття проводиться облік зв'язків, використовуються кількісні порівняння всіх альтернатив для того, щоб свідомо вибрати найкраще рішення, що оцінюється яким-небудь критерієм, наприклад вимірністю, ефективністю, надійністю і т. п.

Системний аналіз складається з основних чотирьох етапів.

Перший етап полягає в постановці задачі – визначають об'єкти, цілі і задачі дослідження, а також критерії для вивчення і управління об'єктом.

Другий етап окреслює границі системи, яка вивчається, і визначається її структура: об'єкти і процеси розбиваються на систему, що вивчається, і зовнішнє середовище. При цьому розрізняються замкнені і відкриті системи. При дослідженні замкнених систем впливом зовнішнього середовища на їх поведінку нехтують. Потім виділяють окремі складові частини системи – її елементи, встановлюють взаємодію між ними і зовнішнім середовищем.

Третій найважливіший етап системного аналізу полягає в складанні математичної моделі системи, що досліджується. Спочатку проводять параметризацію системи, описують виділені елементи системи і їх взаємодію. У залежності від особливостей процесів використовують той або інший математичний апарат для аналізу системи в цілому.

Четвертий етап – це аналіз отриманої математичної моделі,

визначення її екстремальних умов з метою оптимізації і формулювання висновків. Оптимізація полягає в знаходженні оптимуму функції, що розглядається (математичної моделі системи, що досліджується, процесу), і відповідно знаходження оптимальних умов поведінки даної системи або протікання даного процесу. Оцінку оптимізації проводять за критеріями, що приймають екстремальні значення.

На практиці вибрати належний критерій досить складно, оскільки в задачах оптимізації може виявлятися необхідність в багатьох критеріях, які іноді виявляються взаємно суперечливими. Тому найчастіше вибирають який-небудь один основний критерій, а для інших встановлюють порогові гранично допустимі значення. На основі вибору складається залежність критерію від параметрів моделі об'єкта(процесу), що досліджується.

1 ФІТОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ

1.1 Загальні принципи фітометрії та основні фітометричні характеристики рослинного покриву

Основною задачею фітометрії згідно робіт Ю.К. Росса являється кількісне вивчення сукупності характеристик, які описують фігуру, розміри, геометричну і зовнішню структуру рослинного об'єкта, що називається архітектонікою рослинного покриву.

Під фітометрією рослинного покриву як частиною біометрії розуміється масове визначення якісних і кількісних характеристик рослинних організмів, статистична обробка і аналіз цих характеристик, встановлення взаємозв'язку між ними, а також розробка нових, більш складних характеристик, які не підлягають безпосереднім вимірюванням і визначаються розрахунковим шляхом через первинні характеристики. До числа фітометричних вимірювань входять, таким чином, флористичний аналіз РП, фенологічні спостереження за фазами розвитку окремих видів рослин, кількісний опис розміщення рослин і окремих їхніх органів на досліджуваній ділянці РП, а також визначення лінійних розмірів, площ, обсягів, сирої і сухої фітомаси окремих елементів РП.

Для фітометрії рослинного покриву як науки на грані математики і біології характерні деякі специфічні риси. По-перше, масовий характер вимірювань. Методи фітометрії пристосовані не для одиничних об'єктів, або окремих результатів вимірювань, а для їхньої сукупності. По-друге, простота фітометричних вимірювань РП. Вони не потребують складної апаратури і високої кваліфікації спостерігача. По-третє, широке застосування методів і прийомів математичної статистики при проведенні та обробці фітометричних вимірювань.

Основні задачі фітометрії полягають у наступному:

– Визначення простих, легко і достатньо точно вимірюваних в масовій кількості фітометричних характеристик рослинного покриву, необхідних для вивчення радіаційного і водно-теплового режимів, а також його продуктивності. В залежності від поставленої задачі і від конкретних типів РП кількість та характер цих характеристик можуть бути різноманітними.

– Розробка методів, приборів та пристроїв для вимірювання і статистичної обробки вибраних первинних фітометричних характеристик.

– Статистичне дослідження характеристик.

– Встановлення ступеню незалежності окремих характеристик або тісноти зв'язків між ними в даний момент часу і їх зміна протягом вегетаційного періоду. У фітометрії РП звичайно обмежуються розглядом лінійної або квадратичної регресії. Наявність статистичного зв'язку між двома характеристиками дозволяє обмежуватися вимірюванням тільки

однієї з них, тому що другу можна знайти розрахунковим шляхом. Практична цінність розрахункового визначення якої-небудь характеристики висока особливо в тих випадках, коли важко або взагалі неможливо виконати її масове вимірювання.

– Знаходження нових, більш складних фітометричних характеристик РП, що розглядаються у кількісній теорії радіаційного режиму і продуктивності РП, які не підлягають безпосередньому вимірюванню, а також розробка методів і прийомів для визначення цих характеристик розрахунковим шляхом через первинні, безпосередньо вимірюванні характеристики.

– Розробка нових статистичних методів для систематики і морфології рослин.

У кількісній теорії продуктивності РП результати фітометричних досліджень можуть бути використані в основному в двох цілях:

1) кількісний опис архітектоніки як окремих рослин, так і рослинного покриву в цілому; 2) кількісний опис росту і розвитку рослинного покриву.

У першому випадку головна увага приділяється опису структури РП у даний момент часу, час при цьому є деяким параметром. У другому випадку, навпаки, насамперед звертається увага на зміну тієї або іншої характеристики РП протягом вегетаційного періоду, у цьому випадку час розглядається як основна перемінна.

З точки зору архітектоніки рослину можна розглядати як сукупність окремих органів, розміщених у просторі характерним для даного виду способом, причому структура рослини визначається як геометрією окремих органів, так і геометрією їхнього розміщення у просторі. Зовнішня форма рослин визначається біологічними та видовими особливостями організму, умовами зовнішнього середовища, що безупинно впливають на живу рослину, адаптацією рослин до них, внутрішньою і міжвидовою конкуренцією та іншими факторами. Протягом ряду поколінь ці постійно діючі фактори зовнішнього середовища викликають зміни в життєдіяльності рослини, зокрема в його геометричній структурі. Тому можна сподіватися, що зовнішня форма рослини відображає його життєдіяльність, особливості росту та розвитку, а також взаємовідносини між рослиною і зовнішнім середовищем. Отже, архітектоніка рослини як кількісне вираження зовнішньої форми його повинна мати функціональний взаємозв'язок.

Загальну форму рослини легше усього описувати лінійними характеристиками, які підбираються в залежності від моделюємої геометричної фігури. До їх числа z^*_{1P} – висота рослини в природному положенні, що звичайно збігається з верхньою межею листя z^*_{1L} (якщо

остання нижче, то висота повинна бути визначена окремо), z^*_{2P} – нижня межа рослини, a^*_P – ефективний радіус основи рослини, який визначається по проекції його на поверхню землі.

Геометричні фігури з певною точністю відображають дійсну фігуру дерев, кущів і деяких багатолистих рослин, але менше придатні наприклад для злаків і бобових культур. Так, наприклад, фігура основи рослини кукурудзи більш близька до еліпса, чим до кола, і її доцільно характеризувати двома діаметрами рослини d^*_{1P} і d^*_{2P}, причому площа основи рослини $S^*_{1P} = k_P d^*_{1P} d^*_{2P}$. У більш загальному випадку, коли фігура асиметричної рослини задається рівнянням твірної *r = f(z),* об'єм рослини V^*_P і площа бокової поверхні рослини задаються відповідно формулами:

$$V^*_P = \pi \int_0^{z^*_{1P}} f^2(z)dz, \tag{1.1}$$

$$S^*_{2P} = 2\pi \int_0^{z^*_{1P}} f(z)dz. \tag{1.2}$$

Значимими, просто визначаємими і широко застосовуваними фітометричними характеристиками є фенологічні ознаки, що дають загальне уявлення про стан, фазу розвитку та зовнішній вигляд рослин.

До фенологічних характеристик відноситься також n^*_L – загальна кількість листя, що з'явилося у рослини; $n^*_{L\Phi}$ – кількість фотосинтезуючого листя; n^*_j – кількість *j*-тих органів у рослини, причому *j=L* – листя, *j=C* – стебла; *j=I* – коріння; *j=R* – репродуктивні органи.

До числа фітометричних характеристик продуктивності та росту відносяться m^*_j і m'^*_j – відповідно абсолютно суха і сира фітомаса *j*-го органа рослини:

$$m^*_P = \sum_j m^*_j \tag{1.3}$$

– суха маса всієї рослини,

$$\mu^*_j = m^*_j / m^*_P \tag{1.4}$$

– частка сухої фітомаси *j*-го органа у фітомасі всієї рослини.

У ряді випадків опис геометричної структури рослини в межах його об'єму, виходячи з розташування та форми кожного окремого елемента, виявляється занадто складною задачею. Тому при кількісному описуванні структури окремої рослини використовуються також більш грубі та осереднені величини, і замість індивідуальних характеристик окремих елементів рослини виводяться осереднені в межах рослини за де-яким об'ємом величини.

Розглянемо в межах рослини навколо точки $P = (z, a, \alpha)$ деякий об'єм $V^*(P)$, що містить n листків, кожний із яких заданий своїми геометричними параметрами. Якщо S_{li} – площа i-го листка, то сумарна площа листя в обємі - $\sum_{n=1}^{n} S_{Li}$, а сумарна площа листя, що знаходяться в одиниці об'єму, дорівнює

$$u_L^*(P) = u_L^*(z,a,\alpha) = \frac{1}{V^*(P)} \sum_{i=1}^{n} S_{Li} . \qquad (1.5)$$

Так як в об'ємі всієї рослини листя розміщене нерівномірно, а також варіює площа окремих листків, то сумарна площа листя в одиниці об'єму рослини є функцією від координат точки P.

Функція $u_L^*(z,a,\alpha)$ є важливою характеристикою геометричної структури як окремої рослини, так і рослинного покриву, і її називають щільністю площі листя. Вона визначає кількість листової поверхні в одиниці об'єму рослини і розмірність її дм^2/дм^3.

Підсумовуючи щільність листя у всіх точках P в об'ємі рослини, одержуємо сумарну площу листя рослини:

$$\hat{S}_{LP}^* = \iiint_{(V_P^*)} u_L^*(P)dP = \int_{z_{2L}^*}^{z_{1L}^*} dz \int_0^{2\pi} da \int_0^{a_P^*} u_L^*(z,a,\alpha)ada . \qquad (1.6)$$

Опис орієнтації листя, що знаходяться в об'ємі $V(P)$, здійснюється за допомогою щільності розподілу листкових нормалей в усіх напрямках. Для цього розподіляється поверхня одиничної сфери на рівні ділянки, які мають тілесний кут:

$$\Delta\Omega = sin\upsilon_L \, \Delta\upsilon_L \, \Delta\varphi_L , \qquad (1.7)$$

де Ω – тілесний (просторовий) кут;

υ_L – кут нахилу листкової нормалі, що відраховується від осі z;

φ_L – азимут листкової нормалі, що відраховується за годинниковою

стрілкою від північного напрямку.

Після розподілення визначаємо, яка кількість листя усередині об'єму $V(P)$ орієнтована так, щоб їхні листкові нормалі знаходилися усередині i-го тілесного кута $\Delta\Omega_{Li}$, розташованого у напрямку r_{Li} . Визначимо через n_i кількість листків і через S^*_{Lik} площу k-го листка, нормаль якого знаходиться в межах $\Delta\Omega_{Li}$, а через n – кількість листя у $V(P)$. Тоді сумарна кількість поверхні листя, нормалі яких знаходяться усередині i-го тілесного кута $\Delta\Omega_{Li}$, дорівнює $\Delta S^*_{Li} = \sum_{k=1}^{n_i} S^*_{Lik}$, а кількість поверхні листя або їхніх окремих частин, нормалі яких знаходяться в одиничному тілесному куті, розташованому навколо напрямку r_{Li}, дорівнює $\Delta S^*_{Li} / \Delta\Omega_{Li}$. Ця кількість листкової поверхні листя складає деяку частку із загальної листкової поверхні $\sum_i S^*_{Li}$ усередині об'єму $V(P)$ і дорівнює

$$\frac{1}{2\pi} g_L(p, r_{Li}) = \frac{1}{\Delta\Omega_{Li}} \frac{\Delta S^*_{Li}}{\sum S^*_{Li}} \tag{1.8}$$

причому $\sum_i n_i = n$ і $\sum_i \Delta\Omega_{Li} = 2\pi$.

З формули (1.7) випливає, що $\frac{1}{2\pi} \sum_i g_L(P, r_{Li}) \Delta\Omega_{Li} = 1$

або, в інтегральній формі,

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\Omega_1} g_L(P, r_L) d\Omega_L = 1, \tag{1.9}$$

де $\Delta\Omega_L = \sin \upsilon_L \, d\upsilon_L \, d\varphi_L$.

Назвемо *$1/2\pi \; g \; (P_1 \; r_L)$ функцією просторової орієнтації листкової поверхні*, або *щільністю розподілу листкових нормалей*. Вона визначає, яка частка листя у деякому об'ємі рослини навколо точки P орієнтована так, щоб їхні нормалі були спрямовані в одиничний тілесний кут навколо напрямку r^*_L.

У багатьох біогеофізичних і агрометеорологічних задачах зімкнутий рослинний покрив розглядається як горизонтальний шар, наповнений більш-менш рівномірно елементами рослин. При вивченні структури такого шару головна увага приділяється вже не розміщенню та структурі окремих рослин у посіві, а характеристикам, віднесеним до шару в цілому або до одиниці об'єму в шарі. З метою застосування кількісного підходу до опису структури РП окремі органи рослин (листя, квітки і стебла) умовно

розділяються на певну кількість більш дрібних, метамірних елементів (розміщення, орієнтація та ін.), геометричні характеристики яких вивчаються. Тим самим ми начебто "руйнуємо" частину структури РП і, таким чином, спрощуємо об'єкт досліджень, нехтуючи деякими структурними властивостями РП. Але з іншого боку, ми маємо можливість застосовувати кількісні методи, розроблені у фізиці для каламутних середовищ, для опису взаємозв'язку між РП і факторами зовнішнього середовища.

Перейдемо до визначення середніх значень структурних характеристик РП, розуміючи під терміном "рослинний покрив" одновидове угруповання, що моделюється горизонтально однорідним каламутним шаром.

Аналогічно окремій рослині $u_j(z)$ означає щільність фітоплощі j-го складового шару. У загальному вигляді $u_j(z)$ є випадкова величина, яка приймає в горизонтальному шарі РП на висоті z різні значення. У подальшому можна обмежитись математичним чеканням.

Перехід від характеристик рослини до характеристик шару здійснюється таким способом. Нехай σ_o – деяка площа РП, на якій розміщено n рослин. Далі, нехай $\hat{S}^*_{Lk}(z)$ – функція вертикального розподілу листкової поверхні k-ої рослини. Тоді середня щільність листкової поверхні в РП $u_L(z)$ визначається за таким виразом:

$$u_L(z) = \frac{1}{\sigma_o}\sum_{k=1}^{n}\hat{S}^*_{Lk}(z) = N_P\overline{S}^*_L(z), \qquad (1.10)$$

де $N_P = n/\sigma_o$ – густота рослинного покриву і

$$\overline{S}^*_L(z) = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\hat{S}^*_{Lk}(z) \qquad (1.11)$$

– функція вертикального розподілу площі листя "середньої" рослини.

Щільність площі фітоелементів $u_j(z)$ характеризує розподіл по висоті площі j-ої складової РП. Замість неї іноді доцільно використовувати інтегральну характеристику $L_j(z)$. Відносні площі фітоелементів j-ої складової рослини для РП $L_j(z)$ *і* L_{oj} визначаються за допомогою виразів:

$$L_j(z) = \int_{z}^{z_{oj}} u_j(z')dz' \qquad (1.12)$$

і

$$L_{oj} = \int_{z_{00j}}^{z_{0j}} u_j(z')dz'. \qquad (1.13)$$

Остання величина виражає площу фітоелементів *j*-ої складової РП, розташовану над одиничною площею поверхні ґрунту.

Аналогічно функції вертикального розподілу відносної площі окремих складових РП $u_j(z)$ визначаються й інші фітометричні характеристики РП як функції висоти *z*.

Так, наприклад, середня щільність вертикального розподілу сухої фітомаси *j*-ої складової РП $u_{mj}(z)$ визначається формулою

$$u_{mjj}(z) = \frac{1}{\sigma_0}\sum_{k=1}^{n} m_{jk}^*(z) = N_P \overline{m}_j^*(z), \qquad (1.14)$$

де $m_{jk}^*(z)$ і $\overline{m}_j^*(z) = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} m_{jk}^*(z)$ – вертикальний розподіл фітомаси *j*-го органа відповідно у випадку *k*-ої і "середньої" рослини.

Так само визначається середня щільність сирої фітомаси $u'_{mj}(z)$.

Функція просторової орієнтації елементів *j*-ої складової $(1/2\pi)\ gj\ (z, r)$ для шару РП визначається аналогічно випадку окремої рослини. Відповідно моделі горизонтально однорідного шару, функція $(1/2\pi)g_j$ не змінюється в горизонтальному напрямку і залежить тільки від висоти.

1.2 Методичні дослідження у фітометрії

1.2.1 Визначення площі листя

Всі запропоновані методи і прийоми визначення площі листя, які відрізняються один від одного за точністю, проведенням та складністю технічної реалізації, можна розділити на п'ять груп:

1) метод відбитків;
2) метод порівнянь;
3) розрахунковий метод;
4) автоматичне планіметрування;
5) ваговий метод.

Метод відбитків. Суть цього методу полягає в тому, що контур листка яким-небудь способом фіксується на папері або сітці і визначається його площа. Це - історично перший метод визначення площі листя, і він знайшов широке застосування. Позитивними сторонами його є висока точність, (помилка методу досягає 1 %), простота і можливість визначення площі листка без його пошкодження. Самий істотний недолік цього методу

- низька продуктивність. Він практично не придатний для гофрованого листя, а також для дрібного і складного листя, такого наприклад, як листя моркви. В даний час цей метод застосовується як еталонний для перевірки інших методів.

Метод порівнянь. При цьому виготовляється декілька десятків еталонів листків з різною площею. Для кожного досліджуваного листка підбирається підхожий еталон, найбільш точно подібний із листком по площі. Помилка методу, відповідно до оцінок різних авторів, коливається в межах 1,5-8,0 %. Основна перевага його це – висока продуктивність. Негативні сторони – невисока точність і деяка суб'єктивність при виборі еталона, а також необхідність заздалегідь виготовити комплект еталонів для кожного виду рослин.

Розрахунковий метод ґрунтується на моделюванні листка деякою простою геометричною фігурою, по можливості подібній з фігурою листка. Площа фігури визначається за лінійними параметрами довжині h_{1L} і ширині h_{2L}. У такому випадку площа истка визначається по формулі:

$$S_L = k_L f_L (h_{1L}, h_{2L}), \qquad (1.15)$$

де функція f_L виражає площу тієї геометричної фігури за допомогою якої моделюється фігура листка, а k_L – *форм-фактор (чинник)* листка, якийсь середній поправочний коефіцієнт, що враховує відхилення площі реального листка від площі простої геометричної фігури, яка вибирається для моделі. Чим краще справжня фігура листка співпадає з фігурою геометричної моделі тим ближче k_L до одиниці.

У більшості випадків при застосуванні розрахункового методу обмежуються простою формулою

$$S_L = k_L h_{1L} h_{2L}, \qquad (1.16)$$

де k''_L визначається з кореляційного графіка.

Іноді обмежуються тільки одним лінійним розміром в загальному випадку

$$S_L = k'_L h_{1L}^n \quad \text{або} \quad S_L = k''_L h_{2L}^n, \qquad (1.17)$$

де звичайно n = 1 і 2.

Коефіцієнт k_L залежить від сортових особливостей, фази розвитку, умов вирощування, точності еталонного методу визначення S_L. Тому при використанні цього методу коефіцієнт k_L приходиться визначати окремо для кожної ділянки РП і декілька разів за вегетаційний період. Негативним являється невисока точність методу і необхідність в попередньому скла-

данні кореляційних графіків.

Автоматичне планіметрування. Метод ґрунтується на застосуванні спеціальних приладів - автоматичних планіметрів, які можна розділити на такі типи:

– фотопланіметри з паралельним пучком;
– фотопланіметри з інтегруючою сферою;
– фотопланіметри зі скануючим променем;
– планіметр повітряного потоку.

Основною перевагою фотопланіметрів є їхня висока продуктивність, але вони мають ряд недоліків. Більшість із них працює на відрізаних листках і в лабораторних умовах. Крім того, фотопланіметри мають ряд конструктивних недоліків, що є джерелом випадкових і систематичних помилок. У середньому помилка вимірювання площі листя сучасними фотопланіметрами не перевищує 2-4 % і вони знаходять усе більш широке застосування в біології.

Ваговий метод. Він ґрунтується на існуючій залежності площі листя від поверхневої суцільності сирої фітомаси листя та загальної кількості сирої фітомаси листя. Площа листя при цьому визначається за формулою:

$$S_L = \sigma'_L \, m'_L \, , \qquad (1.18)$$

де S_L – площа листя;

σ'_L – поверхнева щільність сирої фітомаси листя;

m'_L – сира фітомаса листя.

Метод припускає існування достатньо постійних середніх значень поверхневої щільності фітомаси листя.

Якщо кількість проб невелика, то звичайно висушуються і зважуються цілі листки. Проте при великому обсязі робіт, наприклад при визначенні повного комплексу фітометричних характеристик посіву, зважування та сушіння потребують багато зусилля і часу. Тому з листка вибивається тільки визначена кількість висічок, які підлягають подальшій обробці. Але при цьому виникає істотне методичне питання: на яких місцях, скільки і якої площі вибивати висічки, щоб одержати дані, близькі до середніх значень усього листка.

Найбільш раціональним було б із кожного листка вибити тільки одну висічку в такій точці $\overline{x}_e$, де $\sigma_L(\overline{x}_e) = \overline{\sigma}_L$.

Експериментально було доведено, що таку точку на жилці знайти можна. Для зеленого листя і при площі висічки $S_{Lв}$ = 2 см^2 $\overline{x}_e$ = 0,63 ± 0,01 для кукурудзи, для сорго – 0,69 ± 0,01, для соняшника – 0,81 ± 0,005. Для бавовнику при $S_{Lв}$ = 0,815 см^2 $\overline{x}_e$ = 0,92 ± 0,005.

Ефективна відстань $\overline{x}_e$ залежить від площі висічок $S_{Lв}$ і зменшується

зі збільшенням її. Оптимальна площа висічки вибирається в залежності від розмірів листка і від зручності зважування. Проведені досліди показали також, що ефективна відстань є характерною для даного виду рослини величиною, яка мало змінюється від листка до листка і протягом вегетації. Її зручно знайти таким способом: на гумовий шнур, що має довжину трохи менше самого короткого листка, наноситься точка $\overline{x}_e$. Розтягуючи шнур уздовж листка так, щоб він покрив усю довжину листка, мітка $\overline{x}_e$ на шнурі відповідно переміщається і вказує на листку правильне місце пробиття висічки.

Вся процедура визначення площі листя методом зважування висічок зводиться до наступного. Від рослини відрізається досліджуваний листок і шляхом зважування визначається його сира фітомаса m'_L. На жилці листка за допомогою гумового шнура визначається ефективна точка $\overline{x}_e$, у якій вибивається висічка за допомогою листкового бура. Перетин бура доцільно вибирати так, щоб площа висічки дорівнювала 0,5; 1; 2 см^2 у залежності від розміру листка досліджуваного виду. Далі зважуванням визначається сира фітомаса висічки $m'_{Lв}$, а після сушіння – абсолютно суха фітомаса $m_{Lв}$.

Вміст води в листі W_L визначається за виразом:

$$W_L = \frac{m'_L - m_L}{m'_L}, \qquad (1.19)$$

де m'_L і m_L – відповідно сира й абсолютно суха фітомаса листка.

Поверхнева щільність фітомаси листка знаходиться у випадку сирої біомаси по формулі:

$$\sigma' = m'/SL \qquad (1.20)$$

і у випадку сухої біомаси як:

$$\sigma_L = m/SL, \qquad (1.21)$$

де σ' і σ_L – відповідно поверхнева щільність сирої і сухої фітомаси.

Розрахунок обводненості листка визначається по формулі:

$$\nu_L = \frac{m'_L - m_L}{m_L} = \frac{W_L}{1 - W_L}, \qquad (1.22)$$

де ν_L – обводненість листка.

Площа листя визначається за формулою:

$$S_L = \frac{1 - W_L}{\sigma_L} m'_L. \qquad (1.23)$$

Точність вагового методу визначається тим, якою мірою поверхнева щільність σ_L і водоутримання W_L , визначене в ефективній точці листка $\bar{x}_e$, характеризують середні значення всього листка і всього посіву.

З усіх методів визначення площі листка метод зважування висічок є найбільш продуктивним і ефективним. Ефективність його полягає в тому, що шляхом одного комплексу простих процедур ми відразу можемо визначити основні фітометричні параметри листка: площу S_L, абсолютно суху фітомасу m_L, водоутримання W_L, обводненість ν_L та ін. Недоліком методу є не дуже висока точність і необхідність проведення попередньої методичної роботи для визначення і вивчення сталості ефективної точки листка $\bar{x}_e$.

1.2.2. Визначення орієнтації листя

А. Лайск розробив прилад, який дозволяє визначати координати листя (υ_L - кут нахилу і φ_L - азимут). У приладі Лайска для визначення функції просторової орієнтації листя $(1/2\pi)\ g_L\ (r_L)$ шкала кутів нахилу υ_L від 0 до 90° була розділена на шість інтервалів через кожні 15°, а шкала азимуту φ_L на компасі від 0 до 360° - на вісім інтервалів, через кожні 45°. Отже, верхня півсфера, куди спрямовані всі листкові нормалі, була розділена на 48 ділянок, що мають шість градацій по куту нахилу і вісім градацій по азимуту.

Для відрізання листя виготовлено ящик із 48 відділеннями. За допомогою приладу визначалося до якого з 48 відділень належить досліджуваний листок або його частина. Після вимірювань листок зрізався і поміщався у відповідне відділення. Після накопичення достатнього матеріалу визначалася площа листя у кожному відділенні і розраховувалася просторова орієнтація листя $(1/2\pi)\ g_L\ (r_L)$.

1.2.3. Метод похилої голки

Метод похилої голки (англ. "inclined point quadrat method") розроблений у тридцятих роках минулого століття в Австралії і спочатку застосовувався для визначення ступеня покриття рослинністю земної поверхні у випадку травостою. Подальший розвиток метод похилої голки одержав у роботах У. Вільсона, в яких він теоретично обґрунтував і застосував для визначення вертикального розподілу фітоелементів окремих складових РП $u_j(z)$ одночасно із середнім кутом нахилу фітоплощі в кожному шарі $\overline{\vartheta}_j(z)$. У. Вільсон також проаналізував і оцінив помилки, обумовлені кінцевими розмірами діаметра голки. Глибокий і обґрунтований математичний аналіз методу, оцінка його придатності і

точності та подальше узагальнення для визначення не тільки середнього кута нахилу фітоплощі $\overline{\vartheta}_j(z)$, але і функції розподілу кутів нахилу (1/2π) g_j (z, ϑ_j) надані в роботах Філіппа (1965).

Суть методу полягає в наступному: рослинний покрив у напрямку $r = (\upsilon,\varphi)$ проколюється довгою голкою, при цьому підраховується кількість контактів голки з окремими органами рослин (рис. 1.1) На рисунку контакти відзначені точками. Їх кількість рівняється семи для листя і чотирьом для стебел.

Розглянемо в РП на висоті z об'єм ΔV з площею основи σ_o і висотою Δz, тобто $\Delta V = \sigma_o \Delta z$. Розділимо площу основи σ_o на велику кількість квадратів і пропустимо голку n саме так, щоб вона проходила через центр кожного маленького квадрата. Нехай ΔN_L – сумарна кількість контактів голки з листям рослин в об'ємі ΔV при всіх n пусках голки. Відповідно до рис. 1.1, довжина шляху одного пуску голки дорівнює $\Delta z/\cos\upsilon_1$, а сумарна довжина шляху всіх пусків $\Delta s = n\Delta z/\cos\upsilon$. Тоді

$$\vartheta_L(z,r) = \frac{\Delta N_L}{\Delta s} = \frac{\Delta N_L}{n} \cdot \frac{\cos\vartheta}{\Delta z} \qquad (1.24)$$

є середня кількість контактів на одиницю довжини шляху, що голка чинить в об'ємі ΔV і напрямку $r = (\vartheta,\varphi)$. Якщо кількість пусків n достатньо велика, то ν_L не залежить від фігури і розмірів листя в ΔV, а залежить тільки від загальної кількості листкової поверхні в ΔV і від орієнтації листя.

У такому випадку

$$\nu_L(z,r) = u_{Le}(z,r) = u_L G = \frac{u_L(z)}{2\pi}\int_{\Omega_1} g_L \left|\cos r\hat{r}_L\right| d\Omega_L , \qquad (1.25)$$

тобто кількість контактів ν_L дорівнює ефективній щільності листкової поверхні u_{Le}.

Для одержання достовірних результатів за допомогою методу похилої голки кількість пусків голки повинна бути дуже велика. Так, наприклад, при випадковому розподілі елементів фітомаси в РП для визначення функції $\nu_L(\vartheta)$ з точністю 1 % потрібно 10 000 контактів голки з листям.

Іншим недоліком методу є те, що через технічні труднощі не можна зробити голку занадто довгою, тому метод практично застосовується для РП, який не перевищує висоту 100-150 см.

Позитивним у методі вважається те, що для визначення фітометричних характеристик РП не потрібно зрізати рослини і на тому

самому місці можна проводити замірювання протягом усього періоду вегетації. Проте, основна цінність методу похилої голки полягає у визначенні не характеристик геометричної структури РП, а детальних статистичних характеристик радіаційного поля в РП.

1.2.4 Метод пошарового зрізання

Пошарове зрізання рослин (англ. "stratifying clip method"), запропоноване японськими вченими Монсі і Саекі, є істотним кроком уперед на шляху розвитку методів фітометрії РП. Метод відразу ж знайшов застосування для вивчення вертикальної структури посівів сільськогосподарських культур та природних фітоценозів і в даний час застосовується усюди.

Суть методу пошарового зрізання полягає в наступному. Досліджувані рослини або досліджувана ділянка РП розділяється на визначену кількість горизонтальних шарів і послідовно починаючи зверху зрізаються всі елементи рослин у даному шарі. Зрізані елементи рослин класифікуються за окремими органами рослин і у кожному класі визначаються середні для шару фітометричні характеристики $u'_{mj}(z)$, $u_{mj}(z)$, $u_j(z)$, $\sigma_j(z)$, $\sigma_{wj}(z)$ і $W_j(z)$.

Звичайно надземні органи рослин при цьому підрозділяються на два класи: фотосинтезиуючі і нефотосинтезуючі.

Метод пошарового зрізання був доповнений ще знаходженням функції просторової орієнтації листя – $(1/2\pi)\ g_L\ (z,\ r_L)$. Для цього в кожному шарі перед зрізанням листя за допомогою приладу Лайска визначається напрямок листкової нормалі і всі листки в шарі додатково класифікуються по напрямку їх листкової нормалі. У випадку складних або великих листків (наприклад, листя кукурудзи) вони розділяються на певну кількість частин, кожна із котрих окремо класифікується по орієнтації.

Хоча метод пошарового зрізання дозволяє визначити з великою точністю і з високим ступенем деталізації всі основні фітометричні характеристики РП, при практичному застосуванні методу виникає ряд труднощів, що знижують його цінність.

По-перше, при зрізанні знищуються досліджувані рослини і не має можливості проводити подальші вимірювання на тій же ділянці. Більш того, тим самим в тій або іншій мірі порушується режим РП і стан ділянок, що примикають до нього. Тому при вивченні динаміки розвитку РП проби беруться з різних ділянок, в наслідок чого виникають труднощі в приведенні до однорідного ряду вимірювань, які проведені на різноманітних ділянках у різний час.

По-друге, трудність польових робіт. Хоча вимірювання, зрізання,

повторне зважування і сушіння не потребує високої кваліфікації спостерігача, але весь комплекс польових робіт для однієї фітометричної зйомки РП необхідно провести в короткий час щоб уникнути помилок, які виникають при порушенні водного режиму і добової динаміки характеристик досліджуваних рослин. Особливо це дуже важливо при сухому і жаркому кліматі.

1.3 Методика проведення фітометричних досліджень посівів зернових культур

Серед значної кількості елементів продуктивності посівів зернових культур найбільш важливими являються ті, що безпосередньо зв'язані з врожайністю господарсько корисних органів і які найбільш повно кількісно і якісно характеризують стан посіву. Такими показниками є суха надземна рослинна маса (фітомаса) *M* і ефективна відносна площа асимілюючої поверхні посіву *L*. Динаміка цих показників та їх значення у певні моменти розвитку використовуються як інтегральні характеристики агрометеорологічних умов вегетації, а також як важливі прогностичні ознаки. Істотною обставиною є можливість кількісної оцінки цих показників дистанційними методами на великих площах.

У роботі В.С. Антоненко, М.І. Гойса, Р.В. Гаценко, визначені принципи організації і запропонована методика проведення фітометричних спостережень за посівами озимих зернових культур на прикладі озимої пшениці, а також правила обробки та оформлення результатів спостережень.

1.3.1. Загальні положення

Рослину озимої пшениці можна умовно розділити на надземну її частину (стебла) і підземну (корінь). У надземній частині рослини у свою чергу виділяють живу (фізіологічно активну) і відмерлу частини.

До живої частини рослини (окремого пагона) відносяться такі фітоелементи: зелені листкові пластини (листки без піхв); стебло; колос; пожовтілі бокові стебла, листкові пластини або їхні частини.

До мертвої частини рослини відносяться відмерлі бокові стебла, листкові пластини або їхні частини.

Фітометричні спостереження за посівами озимої пшениці містять такі визначення:

– густоти стояння рослин і пагонів (кількість рослин і кількість пагонів на одиниці площі посіву);

– висоти рослин;

– сирої надземної рослинної маси (загальної і окремих органів) на

одиниці площі посіву;

– частки сухої речовини в окремих органах рослини;

– сухої (висушеної до абсолютно сухого стану) фітомаси (загальної і окремих органів) на одиниці площі посіву;

– індексу асимілюючої поверхні (площі асимілюючої поверхні окремих органів, або рослини в цілому на одиниці площі посіву);

– фаз розвитку рослин;

– середньої на полі врожайності зерна.

Основною метою фітометричних спостережень являється визначення сухої надземної фітомаси, а також індексу асимілюючої поверхні рослин озимої пшениці на одиниці площі посіву.

Загальну суху масу на одиниці площі посіву розраховують по формулі:

$$M = N(\overline{m}^{o}\sum_{i}\gamma_{i}\mu_{i} + m_{м}^{o}\gamma_{м}), \qquad (1.26)$$

де M – загальна суха біомаса, г/м^2;

i – окремі органи рослини: зелене листя, стебла, колоски, жовте листя;

N – густота стояння пагонів, шт/м^2;

$\overline{m}^{o}$ – середнє значення живої маси одного пагона в сирому стані, г;

γ_i – частка сухої речовини в i-ому органі;

μ_i – частка сирої маси i-го органа в сирій загальній надземній масі;

$m_{м}^{\circ}$ – середнє значення відмерлої маси одного пагона, г;

$\gamma_м$ – частка сухої речовини у відмерлій масі рослини.

Індекс асимілюючої поверхні посіву L, що являє собою суму індексів асимілюючої поверхні окремих фотосинтезуючих органів (листя, стебел, колосків), можна розрахувати по формулі

$$L = N\overline{m}^{o}\sum\frac{\mu_i}{ППШ_i}, \qquad (1.27)$$

де L – індекс асимілюючої поверхні посіву, м^2/м^2;

$ППШ_i$ – питома поверхнева щільність i-го органа (маса одиниці площі поверхні i-го органа), г/м^2.

Похибки фітометричних спостережень. Оскільки в даний період не має єдиних вимог до точності й надійності результатів фітометричних спостережень, при виборі припустимої максимальної похибки визначення тих або інших елементів продуктивності виходять із мети, яка стоїть перед спостерігачем, витрати часу, технічних можливостей (дозвільна здатність вимірювальних приладів, розмірами дослідних ділянок) та ін. Для

вирішення більшості задач в агрометеорології задовільні результати можуть бути отримані лише при використанні даних фітометричних спостережень, отриманих із похибкою, що не перевищує 20 %, при довірчій імовірності не менше 0,90.

Похибка основних фітометричних характеристик при довірчій імовірності 0,90 не повинна бути більше: 1) ±10 % отриманого значення густоти стояння пагонів, сирої маси рослини на одиниці площі посіву; 2) ±20 % отриманого значення індексу листкової поверхні, сухої маси рослини в цілому на одиниці площі посіву.

Похибка визначення приведених вище елементів продуктивності залежить від похибок визначення вхідних у формули (1.26)-(1.27) співмножників і доданків. При наявності у формулі декількох доданків, загальна похибка дорівнює похибці доданка, що має найбільшу похибку. Похибка доданків, поданих у виді добутку декількох співмножників, дорівнює сумі похибок усіх співмножників.

Продуктивність методу. Продуктивність робіт залежить від досвіду роботи спостерігача. Висока продуктивність досягається, як правило, при одночасній роботі двох спостерігачів.

Витрати часу на спостереження:

1) визначення густоти стояння і висоти рослин – 2-4 год.;
2) відбір проби – 30 хв.;
3) детальне розбирання проби в лабораторії – 30 хв.;
4) підготування зразків для висушування – 15 хв.;
5) вимірювання параметрів листя, стебел, колосків – 10 хв.

Витрати часу на обробку результатів спостережень (1 спостерігач):

1) розрахунок сирої і сухої маси на одиниці площі посіву – 20 хв.;
2) розрахунок індексу асимілюючої поверхні – 20 хв.

Умови роботи. Фітометричні спостереження в полі повинні проводитися при відсутності атмосферних опадів (поливів), туману, шквалистого вітру та інших аномальних явищ. Не рекомендується робити підрахунок густоти і відбір проб при рясній росі, відразу після дощу або поливу, при сильному зволожені або розмоканні ґрунту в посіві.

Умови праці повинні бути такі: температура навколишнього повітря від 0 до 35 °С; відносна вологість повітря 20–95 %; швидкість вітру не більше 10 м/сек.

1.3.2. Місце і строки проведення спостережень

Фітометричні спостереження за посівами озимої пшениці проводять на тих же полях, на яких проводяться стандартні агрометеорологічні спостереження (фенологічні спостереження, густота стояння посівів, визначення вологості ґрунту, та ін.).

Фітометричні спостереження за посівами озимої пшениці проводять у строки близькі до дат настання основних фаз розвитку.

У осінній період:

1-ий строк – третій лист (приблизно кінець вересня);

2-ий строк – кущіння (середина жовтня);

3-ій строк – перед припиненням вегетації (1-2-а декади листопада).

У весняно-літній період:

1-ий строк–через 1-2 пентади після відновлення вегетації (початок квітня);

2-ий строк – вихід у трубку (середина квітня);

3-ій строк – поява нижнього вузла соломини над поверхнею ґрунту (початок травня);

4-ий строк – в період між появою нижнього вузла соломини і колосінням (3-4 пентади травня);

5-ий строк – у період масового настання фази колосіння ;

6-ий строк – молочна стиглість, формування зерна (2-3 пентади червня);

7-ий строк – воскова стиглість;

8-ий строк – повна стиглість.

1.3.3. Необхідні засоби вимірювання, устаткування та матеріали

Засоби вимірювання: терези технічні типу ВЛТК-500 або Т-200 (1000); снігомірна рейка М-104-П ТУ 52-07-60-67 або лінійка довжиною 1,0 м; мірна стрічка або рулетка довжиною 10 м.

Допоміжне устаткування і матеріали.

Для проведення фітометричних спостережень необхідно таке устаткування та матеріали: сушильна шафа; ножиці канцелярські; лопата для викопування рослин; картонні коробки для сушіння рослинних проб розміром приблизно 10×15×7 см по 5 шт. на 1 варіант спостережень; поліетиленові мішки або пакети з крафтового паперу для доставки проб у лабораторію; паперові етикетки; папір для запису, бланки таблиць ТСХ-11.

Для оперативних розрахунків у польових умовах рекомендується використовувати малогабаритний мікрокалькулятор з автономним живленням.

Форма звітності. Звітними документами за результатами фітометричних спостережень являються заповнені відповідні таблиці.

Результати фітометричних спостережень дозволяють отримати об'єктивну інформацію про фотосинтетичну продуктивність та стан посівів зернових культур.

2. ФІЗІОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА БІОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ

2.1 Морфологічний аналіз рослин

Встановлено, що рослина у цілому, як і кожний окремий її орган, в своєму розвитку і формуванні проходить ряд послідовних етапів. При всіх специфічних особливостях різних видів, родів і сімейств вищих рослин у їх індивідуальному розвитку Ф.М. Куперман виділила дванадцять етапів органогенезу. На кожному з них формуються характерні для даного етапу органи. При цьому в процесі проходження етапів органогенезу змінюється потреба рослин в забезпеченності теплом, світлом, вологою, живленням.

На основі вивчення закономірностей органогенезу і взаємозв'язків між фазами розвитку, етапами органогенезу та формуванням елементів продуктивності Ф.М. Куперман був розроблений метод морфофізіологічного аналізу рослин, який полягає в систематичних спостереженнях за мінливістю в онтогенезі органів, що формуються і за мікроскопічними процесами диференціації верхніх меристем. Для практичних цілей сільського господарства можна використати більш простий метод біологічного контролю.

2.1.1 Характеристика етапів органогенезу рослин

Фенологічними спостереженнями реєструються основні фази розвитку та росту рослин, однак, вони не відображають всіх складних органоутворюючих процесів, що протікають у міжфазні періоди. Весь процес органогенезу рослин проходить етапами на основі певних стадій розвитку і тому, встановивши, на якій стадії проходить той або інший етап органогенезу, можна потім за станом етапів органогенезу з порівняно високою мірою достовірності судити про протилежне, тобто на якій стадії розвитку знаходиться рослина.

Розглянемо більш детально характеристику етапів органогенезу вищих рослин (рис.2.1). На I і II етапах органогенезу формується вегетативна сфера пагона.

I *етап органогенезу* у більшості сільськогосподарських рослин проходить в міжфазний період проростання насіння – поява сходів. У багаторічних полікарпічних рослин пазушні бруньки, з яких розвиваються пагони другого, третього і подальших порядків, також починають свій розвиток з I етапу. При цьому в конусі наростання відбувається анатомічна диференціація первинної меристеми на основні тканини майбутнього стебла і листя.

У основі конуса наростання добре розпізнаються зародкові листки. Так, наприклад, у ярової і озимої пшениці є 3-5 зародкових листка, у

кукурудзи – 5-7, у соняшника – від 3 до 7, в залежності від скороспілості сорту. На цьому етапі конуси наростання не тільки різних сортів, але і різних видів рослин зовні дуже схожі і розрізняються частіше розмірами та мірою опуклості первинного горбика зачаткового стебла.

II *етап органогенезу*. Вслід за появою сходів рослини переходять у II етап органогенезу. Цей етап у більшості рослин проходить за міжфазний період сходи – вихід в трубку або початок стеблювання, а у багаторічних рослин співпадає з процесом внутрішньобрунькової диференціації верхушечної і пазушних бруньок. II етап органогенезу характеризується диференціацією конуса наростання на вузли і вкорочені міжвузлля зачаткового стебла, а також формуванням листкових зачатків. У багатьох видів рослин закладається не тільки кількість вузлів та міжвузлів дорослого пагона, але і характер кущіння злаків та гілкування стебла у дводольних рослин. У рослин з незавершеним ростом пагона (наприклад, у багатьох видів бобових та гарбузових рослин) на II етапі тривало йдуть процеси диференціації вузлів і міжвузлів стебла.

Кількість вузлів і листя стебла метамерів, що закладаються на II етапі органогенезу, визначається видовими (сортовими) особливостями рослин та умовами їх розвитку в цей період. При сприятливих умовах погоди кількість метамерів стебла є типовим для кожного сорту або виду рослин.

У більшості зернових культур фаза вихід в трубку супроводиться переходом пагона до III етапу органогенезу і майже відразу переходом до IV етапу. На III і IV етапах органогенезу відбувається диференціація осі суцвіття.

III *етап органогенезу*. Витягнення і «сегментація» конуса наростання – зачаткової осі суцвіття. Чим сприятливіші умови для ростових процесів на III етапі, тим більше формується зачаткових члеників колоса, віничка, кошика і тим довше буде колос, більше качан, ширше діаметр кошика соняшника. Оскільки III етап проходить швидко, то спостереження за сегментацією конуса наростання проводяться звичайно без детального підрахунку зміни кількості сегментів.

IV *етап органогенезу*. Формування так званих лопатей суцвіття, зачаткових гілочок суцвіття або колоскових горбиків у злаків.

Таким чином, на III і IV етапах органогенезу, які у більшості рослин проходять ще на початку виходу в трубку або на початку стеблювання, вже визначаються можливі величини суцвіття, колоса, віничка, качана, кошика і парасольки. Завершується IV етап органогенезу утворенням квіткових диференційованих горбиків (квіткової меристеми). Кількість квіткових горбиків у суцвітті може продовжувати наростати на V етапі.

На V і VI етапах органогенезу формуються квітки і генеративні органи, археспорій, мікроспори (материнські клітини пилку) і макроспори

(зародкові мішки).

V *етап органогенезу* характеризується диференціацією основних органів квітки. Спочатку у більшості видів рослин утворяться зачатки покривних органів – чашечки та віночка і власне генеративних органів – тичинкових і маточкових (пестикових) горбиків. У кінці V етапу в них можна розрізнити утворення первинного археспорія, потім спостерігається подальша диференціація клітин повторного археспорія.

VI *етап органогенезу.* Здійснюються процеси утворення материнських клітин пилку (мікроспор і мікроспороцитів) зародкового мішка (макроспор і макроспороцитів). Цей етап характеризується також початком посиленого росту покривних органів квітки.

На VII і VIII етапах органогенезу звичайно завершується формування гамет (статевих клітин рослини – пилку і яйцевого апарату зародкового мішка). Квітка здатна до здійснення основної функції – запліднення.

VII *етап органогенезу.* Відбувається формування чоловічого і жіночого гаметофіту. Пилкові зерна значно збільшуються в розмірах. Одночасно продовжується посилений ріст зародкового мішка. Спостерігаються високі темпи росту покривних органів квітки, які захищають на цьому етапі генеративні органи, причому віночок росте швидше, ніж чашечка. Посилено розростаються вегетативні органи суцвіття – членики колоса, гілочки волоті, головка конюшини, квітколоже кошика; витягуються тичиночні нитки, росте стовпчик маточки, збільшується розмір зав'язі.

VIII *етап органогенезу.* Завершуються процеси гаметогенезу та формування статевого апарату рослин – пилку і яйцеклітини. На цьому етапі відбувається формування видимої частини фази бутонізації, вихід віночка за межі чашечки, посилений ріст міжвузлля, що несе суцвіття та цвітоноси. Відмічаються фази колосіння (викидання волоті) у пшениці, жита, ячменю, вівса і багаторічних злаків, а також появи ниткоподібних стовпчиків з обгортки качана у кукурудзи (цвітіння).

IX *етап органогенезу.* Цвітіння запліднення та формування (створення) зіготи. Процеси цвітіння у квіткових рослин, розрізняються по своїй тривалості, способами запилення, типами запліднення і в кінцевому вигляді ведуть до створення зіготи.

X *етап органогенезу.* Посилений ріст плоду, зародка та ендосперми насіння. На цьому етапі дуже рано починається розподіл зіготи, утворення зародка і заповнення клітинами ендосперма зародкового мішка.

На X *етапі органогенезу* зародок починає диференціюватися на осьові органи і сім'ядолі. Встановлено, що до кінця X етапу органогенезу насіння багатьох видів рослин (пшениці, жита, бавовнику та ін.) є життєздатними. Їх можна дорощувати на живильних середовищах, і при

дотриманні певних умов схожість насіння досягає 90-100 %. У цей час у зародка добре помітні зародковий корінь з кореневим чехоликом і брунька з декількома зародковими листочками. Кількість та форма їх визначаються видовими (сортовими) особливостями насіння.

На XI, XII етапах органогенезу завершується формування плоду та насіння, йдуть процеси накопичення поживних речовин і перетворення їх в запасні, специфічні для кожного сімейства, роду, виду (сорту).

XI *етап органогенезу*. Цей етап характеризується ростом плодів в діаметрі, різкою зміною будови стінок зав'язі та накопиченням поживних речовин. На цьому етапі, коли в плодах і насінні накопичується велика кількість води, вони досягають свого максимального розміру: при цьому в насінні у відповідності з їх видовою і сортовою специфікою йде ряд складних біохімічних процесів. У той же час із завершенням морфологічної диференціації їх ріст (плоду, насіння і зародка) як в довжину, так і ширину різко уповільнюється.

XII *етап органогенезу* – дозрівання насіння. Цей етап характеризується перетворенням поживних речовин в запасні, різким обезводненням насіння, переходом зародка насіння у деяких видів в стан тимчасового вимушеного (у багатьох видів глибокого, органічного) спокою. При цьому від специфіки запасних поживних речовин, накопичених в насінні, залежать не тільки видові, але і сортові особливості росту паростків на ранніх етапах органогенезу. Ці особливості у величезної більшості видів рослин впливають на ріст рослин на більш пізніх етапах. У деяких крупноплідних видів рослин диференціація органів квітки (аж до VI етапу) може здійснюватися при вирощуванні рослин в темряві за рахунок запасних речовин насіння (при умові нормального формування материнської рослини на XI, XII етапах органогенезу). У більшості видів рослин XII етап завершується повною стиглістю насіння.

Тривалість етапів органогенезу, інтенсивність органоутворення та амплітуда варіювання тривалості кожного етапу визначається ходом спадкової інформації виду (сорту) і мірою оптимізації ведучих чинників, до яких адаптована рослина. Така загальна характеристика основних етапів органогенезу більшості однолітніх сільськогосподарських культур.

У багаторічних полікарпичних, трав'янистих і древесних рослин пагони різних років життя, так само, як і пагони різних порядків на одній і тій же рослині, можуть бути одночасно на різних етапах органогенезу. У той же час як одні пагони тільки ще закладаються в бруньці і знаходяться на I і II етапах органогенезу і з них потім виростають ростові пагони, багато років ще перебувають на II етапі у вегетуючому стані, репродуктивні пагони швидко розвиваються і досягають XII органогенезу. Тому у багаторічних рослин прийнято розрізнювати систему пагонів, а про стан розвитку рослини загалом судити по пагонах, що досягли найбільш

високого рівня розвитку (етапів органогенезу).

2.1.2 Особливості і контроль формування конуса наростання озимих культур в осінній, зимовий та весняний період

У осінній і зимовий періоди, коли рослини озимих культур знаходяться в фазах сходи – кущіння, конус наростання буває на I і II другому етапах органогенезу.

Перший етап органогенезу звичайно проходить в фазі сходи – другий лист (рис. 2.1). При цьому конус наростання являє собою недиференційований горбик, блідо-зеленуватий або майже білий з добре вираженим тургором.

З фази третього листа і до кінця кущіння конус наростання знаходиться на II етапі органогенезу. На цьому етапі конус наростання збільшується, на ньому утворюються листові валики – зачатки справжніх стеблевих листків.

Конуси наростання в межах куща розрізнюються своїми розмірами. Найбільш великі і розвинені – у головного і перших двох бокових пагонів, у подальших пагонів вони відповідно порядку розвитку менше. Конус наростання кожного пагона восени і зимою знаходиться безпосередньо над вузлом кущіння (рис. 2.2).

Найбільш диференційований конус наростання до кінця осінньої вегетації буває при оптимальних строках сівби у головних пагонів озимого жита і озимого ячменю, довжина його досягає 0,30-0,40 мм. У озимої пшениці конус наростання восени менших розмірів (у головних пагонів 0,25-0,35 мм, а у бокових 0,05-0,10 мм). Рослини високозимостійких сортів озимої пшениці мають довжину конуса наростання мінімальних розмірів, у слабозимостійких сортів вона досягає найбільших розмірів (0,30-0,55 мм).

Розміри конуса наростання восени значною мірою залежать від строків сівби, попередника та агрометеорологічних умов (табл. 2.1).

При ранніх строках сівби, достатньому і надмірному зволоженні ґрунту, сильному кущінні (більше шести пагонів) та великій висоті (більше за 25 см) конуси наростання у головних пагонів витягуються в довжину, збільшується кількість листкових валиків і в окремі роки спостерігається перехід їх до третього етапу органогенезу восени.

При пізніх строках сівби або недостатніх запасах вологи в ґрунті, особливо по непарових попередниках, рослини слабо або зовсім не кустяться і не утворюють вузлового коріння. Конус наростання у таких рослин (озимих культур) досягає лише 0,10-0,20 мм. Рослини з нормальними розмірами конусів наростання мають найбільшу здібність до загартування і більш зимостійкі.

Таблиця 2.1 – Динаміка росту конусів наростання головних пагонів озимої пшениці

Строк сівби	Дата аналізу	Сніжний покрив природний			
		Фаза	Етап	Довжина конуса наростання, мм	Висота сніжного покриву, см
29. VII	15. X	Кущіння	II	0,7	0
	18. XI	»	II	0,8	0
	25. XII	»	II	0,8	10
	21. I		II	0,8	0
	23. II	»	II	0,9	20
	22. IV	Початок виходу в трубку	III, IV	1,1	0
25. VIII	15. X	Кущіння	II	0,4	0
	18. XI	»	II	0,5	0
	25. XII	»	II	0,5	10
	21. I	»	II	0,5	0
	23. II	»	II	0,5	20
	22. IV	Вихід в трубку	III	0,8	0
3. IX	15. X	Кущіння	II	0,4	0
	18. XI	»	II	0,4	0
	25. XII	»	II	0,4	10
	21. I	»	II	0,4	0
	23. II	»	II	0,4	20
	22. IV	Початок виходу в трубку	III	0,5	0
18. IX	15. X	3-й лист	I	0,2	0
	18. XI	Те ж	II	0,2	0
	25. XII	»	II	0,3	10
	21. I	»	II	0,3	0
	23. II	»	II	0,3	20
	22. IV	Початок виходу в трубку	II, III	0,5	0

У перерослих рослин із збільшеним розміром конуса наростання вже з осені можна чекати зменшення зимостійкості, особливо зменшену стійкість до випрівання і шкідливого впливу різких коливань температури повітря та ґрунту при тривалій відлизі, що спричиняють танення снігу і надалі утворення притертої до ґрунту крижаної кірки. У слабо розвинених рослин з невеликими розмірами конуса наростання стійкість до вимерзання і вимокання також гірше, чим у добре розвинених. Випиранню і видуванню таких рослин сприяє слабкий розвиток у них кореневої системи. Таким чином, за станом конусів наростання вже з осені можна визначити як підготувалися рослини до зимівлі. Не менш важливе значення для перезимівлі озимих культур має стан конуса наростання у зимовий період, особливо його зміни, викликані аномальними умовами

зимівлі.

При оптимальних умовах зимівлі, коли рослини знаходяться під сніжним покривом і температура ґрунту на глибині вузла кущіння утримується в межах –7, –8 °С, конус наростання у всіх озимих культур залишається на другому етапі, і розміри його не змінюються до виходу із стану вимушеного спокою.

В умовах недостатньої або повної відсутності сніжного покриву і пониження мінімальної температури ґрунту на глибині вузла кущіння до меж, близьких до критичної температури вимерзання рослин, конус наростання дуже пошкоджується. Він втрачає тургор, зморщується, тканини стають каламутними, з'являється жовто-буре і навіть коричнево-чорне забарвлення, і всі пагони гинуть (див. рис. 2.2).

При менш сильних пошкодженнях конуси наростання стають прозоро-білими і дещо змінюють свою форму. Такі пошкодження конуса наростання часто зовні виявляються на рослинах весною або навіть літом (післядія зимових пошкоджень). Такий же стан конусів наростання спостерігається при тривалій дії на рослини притертої до ґрунту крижаної кірки.

В умовах надмірного сніжного покриву (при висоті його більше 30 см), слабому промерзанні ґрунту (менше 80 см), коли мінімальна температура ґрунту на глибині вузла кущіння вище за –5 °С, а максимальна досягає 0 °С, конус наростання починає рости, витягується в довжину і при цьому не диференціюється. Весною ця частина конуса не переходить до IV етапу органогенезу і відмирає.

Аналогічна зміна конуса наростання буває в роки з тривалими та інтенсивними відлигами, навіть при відсутності сніжного покриву. В таких умовах рослини втрачають стійкість до низьких температур та інших несприятливих явищ. При цьому у менш зимостійких сортів відбувається більш інтенсивний ріст конусів наростання і це відповідно призводить до великої загибелі рослин.

Зміна стану конусів наростання зимою визначається також біологічними особливостями сорту. Довжина конуса наростання у рослин менш зимостійких сортів озимих вже з осені виявляється значно більшою, ніж у високозимостійких сортів.

Техніка проведення аналізу конуса наростання (біологічний контроль) озимих культур та вибір спостережливих ділянок. Біологічний контроль потрібно провести на тих же спостережливих ділянках, які вибираються для стандартних агрометеорологічних спостережень за станом озимих культур. Визначення стану конуса наростання, при проведенні біологічного контролю, здійснюється на тих же рослинах, які беруться (викопуються) для обліку густоти рослин, коефіцієнта кущіння, глибини залягання вузла кущіння при осінньому і весняному обстеженнях

озимих посівів. Спостережливі ділянки повинні характеризувати переважно стан посівів в районі метеорологічної або агрометеорологічної станції (строки сівби, сорт, попередник, рівень агротехніки, тип ґрунту та рельєф).

Взимку на цих же спостережливих ділянках, де вирубуються моноліти для відрощування проб, береться проба для біологічного контролю.

До настання температури –14, –15 °С на глибині вузла кущіння проби беруться раз в місяць. Якщо ж температура опускалася навіть на короткий час нижче за –14 °С на посівах озимого ячменю, нижче за –16 °С на посівах озимої пшениці і нижче за –18 °С на посівах озимого жита, то проби озимих на кожній ділянці рекомендується брати ще додатково.

При взятті проб для біологічного контролю після очищення майданчика від снігу вибирають два паралельних рядка довжиною 25 см (одна проба). Такі проби беруть на ділянці не менш ніж в чотирикратній повторності. Глибина взяття рослин повинна бути не менше за 6-8 см. Вирубуючи рослини, треба стежити за тим, щоб не пошкодити вузли кущіння. Кожну пробу треба загорнути в папір і скласти в ящик, на дно якого потрібно покласти солому, зверху для утеплення також закрити папером. У дні, коли температура опускається нижче –20 °С, щоб уникнути помилок, пов'язаних з пошкодженням рослин, під час взяття проб, краще їх не брати. Якщо ж стійкі морози продовжуються тривалий час, то потрібно вживати заходів до хорошого утеплення проб відразу ж після їх вирубки з ґрунту. Вага однієї проби з грудками ґрунту звичайно не перевищує 1 кг.

Техніка визначення стану рослин у пробах. Доставлені з поля ящики з пробами вносять для відтаювання в приміщення, де температура не вище 12 °С. Після відтанення ґрунту, через 10-12 годин, рослини обережно відділяють від ґрунту, промивають водою кімнатної температури і кладуть корінням в тарілки з водою. Тепер їх можна починати препарувати. Для цього відрізають коріння на відстані 2 см від вузла кущіння і у пагонів послідовно знімають верхнє листя. Місце розташування конуса наростання восени і взимку вже було показане на рис. 2. Голкою обережно видаляють недорозвинені листочки, що покривають конус наростання. Оголений конус наростання розглядають в бінокулярну лупу. У живих рослин конус наростання блідо-зелений або майже білий, з добре вираженим тургором всіх тканин. У рослин, загиблих від низьких температур, конус наростання характеризується повною втратою тургору (при дотику голкою відчувається м'якість тканин), помутнінням клітин, появою жовто-бурого і навіть коричнево-чорного забарвлення.

Можна використати також спостереження за конусами наростання за допомогою барвників (фуксина або тетразола). Для оцінки життєздатності

конусів наростання, робляться зрізи через вузол кущіння і конус наростання, а потім рослини ставлять на 15 хв. в 0,3 %-ний водний розчин кислого фуксину. Після промивання від фуксину живі клітини залишаються безбарвними або блідо-зеленуватими; загиблі клітини конуса наростання, як і тканини вузлів кущіння, стають яскраво-червоними, а слабо пошкоджені – світло-рожевими.

У рослин після їх відтаювання в холодній воді при температурі 8-10 °С відмивають і відрізають коріння і листя за 3-5 мм від вузла кущіння; відрізані вузли кущіння поміщають в склянки і заливають 0,5%-ним розчином тетразола і витримують 1 годину в термостаті при температурі 40 °С або закривають їх темним непрозорим матеріалом і залишають в приміщенні на 4 години. Живі тканини рослин, в тому числі і конуси наростання, забарвлюються в оранжевий або червоний колір, а загиблі не забарвлюються зовсім.

Рослини, взяті в полі звичайно на I і II етапах органогенезу, можуть зберігатися у воді при кімнатній температурі протягом 5-10 годин, залишаючись при цьому (морфологічно) на тому ж етапі органогенезу, на якому вони були взяті в полі. Навесні при проходженні рослинами IV і V етапів органогенезу рослини необхідно аналізувати негайно. Щоб можна було зберігати рослини на різних етапах органогенезу протягом більш тривалого терміну (до 3-5 днів), їх кладуть в холодильник при температурі 2-3 °С.

При оцінці стану рослин потрібно окремо вказувати міру пошкодження листя і конусів наростання.

Методика оцінки стану озимих за результатами біологічного контролю конуса наростання і листя рослин. Протягом зимового періоду при несприятливих умовах насамперед ушкоджується листя. Степінь пошкодження їх в значній мірі визначає стан рослин у весняно-літній період. У тих випадках, коли листя не пошкоджене (зелене або частково жовто-зелене), у рослин після сходу сніжного покриву та підвищення температури повітря до позитивних значень починається фотосинтез. Розвиток таких рослин навесні проходить нормально. Стан листя цих рослин оцінюється балами 5 і 4.

Згідно робіт В.О.Моісейчик якщо взимку і навесні все або велика частина листя жовта і конуси наростання живі, то для появи нового асимілюючого листя після поновлення вегетації необхідний деякий період часу, внаслідок чого ріст та розвиток рослин затримуються, і урожай трохи знижується. При такому стані листя озимих оцінюються балом 3. Рослини, у яких листя взимку і навесні буре, оцінюються балом 2, чорно-бурі – балом 1. У більшості таких випадків спостерігається також пошкодження конусів наростання, вузлів кущіння і зрідженість посівів або повна загибель рослин.

Конуси наростання мають більш високу стійкість, ніж листя, до того ж вони у озимих розташовані в ґрунті на глибині 1-3 см. Від стану конуса наростання залежить життєздатність пагонів, ріст і розвиток зачаткового колоса а, також його продуктивність. Тому стан конуса наростання, визначає стан рослин загалом за період перезимівлі. Конуси наростання в залежності від міри їх пошкодження взимку можна оцінити таким чином: 5 балів – конус прозорий, живий, тургорний, злегка опалесцируючий; 3 бали – конус живий, білий, тургорний, каламутний, неопалесцируючий; 1 бал – конус мертвий, бурий, зморщений, мацеруваний. Стан рослин оцінюється з урахуванням кількості пагонів в процентах загальної кількості їх у рослин, які аналізуються, за різною мірою пошкодження конуса наростання.

2.1.3 Методика спостережень за етапами органогенезу озимої пшениці

Спостереження за станом рослин озимої пшениці, при переході їх до чергових етапів органогенезу потрібно проводити згідно робіт Є.С.Уланової протягом усього вегетаційного періоду, починаючи з осені і кінчаючи повною стиглістю, коли закінчується вегетація озимих культур і вони готові до збирання. Підрахунок кількості елементів продуктивності (колосків, квіток), що закладаються та формуються, проводиться в кінці певних етапів органогенезу. Підрахунки проводяться як в колосі головного, так і інших продуктивних пагонів. Етапи органогенезу визначаються на самих розвинених пагонах, колосках та квітках.

У табл. 2.2 і 2.3 приведена форма, в яку заносяться результати спостережень за найбільш важливими періодами формування елементів продуктивності. Аналіз зібраних в табл. 2.2 і 2.3 даних дозволяє оцінити зв'язок між тривалістю етапів органогенезу (середня, найбільша і найменша) і кількістю продуктивних пагонів, колосків та квіток. Як приклад приведені дані для двох пунктів, розташованих в Лісостепній зоні та Південному Степу.

Приведемо дані про час настання і тривалість окремих етапів органогенезу і критерії визначення їх часових меж. У рослин озимої пшениці I етап органогенезу починається восени, з моменту посіву насіння в ґрунт і його проростання, і триває до фази сходів. Конус наростання в цей момент знаходиться під поверхнею ґрунту у вигляді мікроскопічного купола під прикриттям зачаткового листя.

II етап органогенезу починається, як правило, також восени і співпадає з фазами 3-й лист і кущіння. З початком II етапу органогенезу відбувається посилена диференціація основи конуса наростання на зачаткові вузли, міжвузлля і зачатки стеблевих листків; в пазухах

листкових зачатків закладаються зачатки пагонів кущіння. Таким чином, вже на II етапі, восени, в деякій мірі визначається майбутня кількість продуктивних пагонів. II етап у рослин озимої пшениці триває дуже довго, як правило, осінь і всю зиму, і від стану рослин на цьому етапі залежить їх перезимівля.

Таблиця 2.2 – Дані спостережень за тривалістю етапів органогенезу озимої пшениці (методом біологічного контролю)

Фенологічна фаза	Етап органо генезу	Південний Степ, Одеса			Лісостеп, Миронівка		
		Тривалість етапів, дні					
		середня	макс.	мін.	середня	макс.	мін.
Кущіння, початок виходу в трубку	III, IV	22	26	18	26	40	15
Вихід в трубку, стеблювання	V-VII	38	48	28	37	48	29
Колосіння, цвітіння	VIII, IX	10	12	7	12	19	6
Формування зернівки, молочна і воскова стигл.	X–XII	42	51	30	40	55	25

Таблиця 2.3 – Дані спостережень за елементами продуктивності озимої пшениці

Елемент продуктивності	Південний Степ, Одеса			Лісостеп, Миронівка		
	Кількість елементів продуктивності					
	середня	макс.	мін.	середня	макс.	мін.
Кількість потенційно продуктивних стебел, що перейшли на IV етап	550	700	400	600	800	450
Кількість колосків у зачатковому колосі	20	22	18	18	20	16
Кількість розвинених квіток у колосі в кінці VII етапу (потенційна озерненность колоса)	43	55	33	58	76	40
Кількість розвинених квіток у колосі в кінці IX етапу	40	50	32	38	48	31
Кількість продуктивних стебел на 1 м^2	500	630	250	500	650	250
Кількість зерен в колосі	38	47	30	33	46	23
Маса 1000 зерен, г	38,9	41,7	34,5	38,9	43,8	26,0

Формування елементів продуктивностів в основному починається весною з моменту відновлення вегетації. У цей момент пшениця знаходиться, як правило, ще на II етапі органогенезу. В Україні, термін початку відновлення вегетації коливається за роками і охоплює головним чином період з другої декади березня до кінця третьої декади березня. При пізній холодній весні у лісостепній зоні України відновлення вегетації може відмічатися лише в кінці першої декади квітня. Тривалість періоду від відновлення вегетації до початку III, IV етапів органогенезу, в залежності від умов року, складає від 3 до 15 днів. Як тільки наступають умови, сприятливі не тільки для росту, але і для розвитку рослин, починається перехід до III етапу органогенезу, який проходить дуже швидко. Визначити його без достатньої навички важко, тому часто об'єднують III етап з IV, який морфологічно легко визначити по тому, як формуються по всій довжині конуса наростання колоскові горбики. Надалі ми будемо говорити про об'єднані III і IV етапи, як про один етап органогенезу.

III і IV етапи на півдні України починаються в період з 15 по 30 березня і тривають 18-26 днів. В Лісостепній зоні України озима пшениця переходить до III, IV етапів пізніше – з 20 березня по 30 квітня, тривають вони від 11 до 40 днів в залежності від погодних умов року. Перехід до III, IV етапів, як правило, співпадає з початком розтягнення найнижчих міжвузлів стебла, і закінчуються вони у фазі вихід в трубку. Якщо в цей час видалити все стеблеве листя, то над верхнім вузлом можна виявити зачатковий колос, в якому за допомогою лупи можна бачити колоскові горбики, з яких сформуються майбутні колоски.

З переходом до V етапу органогенезу закладка нових колосків припиняється і починається диференціація квіток в колосках, тому саме на межі між кінцем IV і початком V етапу органогенезу потрібно робити підрахунок кількості колосків, що заклалися. Для отримання достовірних даних для аналізу беруть не менше 30 типових рослин.

Початок V етапу органогенезу співпадає з добре вираженою фенофазою вихід в трубку і закінчується етап в період, коли починається інтенсивний ріст середніх міжвузлів і колос промацується як невелике потовщення на верхівці пагона. У озимих V етап раніше наступає в Степовій зоні (перша - друга декади квітня, тривалість від 14 до 24 днів) і пізніше – у Лісостеповій зоні (кінець квітня, а в деякі роки при пізньому відновленні вегетації навіть у першій декаді травня, тривалість 12-24 дні).

У кінці V етапу, знявши з пагонів листя і оголивши колос, за допомогою бінокулярної лупи МБС-1 або лупи з 10-ти кратним збільшенням можна підрахувати кількість квіток в кожному колоску колоса. У сортів інтенсивного типу в колоску в середній частині колоса нараховується від 8 до 12 квіток, а у сортів екстенсивного типу – від 5 до 7.

У всіх сортів озимої пшениці кількість квіток варіює в залежності від місцерозміщення колосків вздовж осі колоса, більше усього їх в колосках середньої частини колоса. Для підрахунку кількості квіток, що заклалися беруть не менше 10-ти типових рослин.

Настання VI етапу органогенезу найбільш точно визначається за допомогою мікроскопа по забарвленню ацетокарминовим препаратом, виготовленим із вмісту пильників.

У звязку із складністю такого визначення і нетривалості VI етапу при проведенні біологічного контролю на агрометеорологічних станціях, його можна об'єднати з VII етапом. Надалі ми будемо говорити про VI і VII етапи органогенезу, як про один етап. Початок цього етапу, як вже було сказано вище, співпадає з початком розтягнення середнього міжвузлля стебла. Якщо на цьому етапі розглянути квітку в лупу, то можна побачити, що маточка опушена і довжина рильця маточки перевищує висоту зав'язі. Для цього етапу також характерний ріст пильників і тичиночних ниток. До кінця VI, VII етапів починається інтенсивне розтягання осі колоса, ріст колоскових і квіткових лусочок (чешуйок). Закінчуються VI і VII етапи на початку фази колосіння, коли верхівка колоса з' появляється із під останнього листка. Розвиток квіток в межах кожного колоска, починаючи з V етапу, проходить не синхронно, значна частина квіток, що заклалися у верхній частині колоска, сильно відстає в розвитку від нижніх квіток і до кінця VI, VII етапів починає підсихати. Із 8-12 квіток, що заклалися в колоску, продовжують розвиток всього 1-3 квітки. У кінці VI,VII етапів підраховується кількість цілком розвинених квіток, що не засохли. Аналіз проводиться за допомогою лупи не менш ніж на 10-ти типових рослинах.

VIII етап органогенезу починається з початком колосіння і закінчується перед цвітінням.

Початок цвітіння – це початок IX етапу органогенезу. На VIII, IX етапах органогенезу частина квіток в колосках також засихає, тому в кінці IX етапу підраховується кількість квіток, що продовжують свій розвиток, не менш ніж на 10-ти типових рослинах.

Збільшення розміру запліднeної на IX етапі зав'язі, тобто початок росту зернівки (зерна), відмічається як перехід до X етапу органогенезу, який закінчується, коли зернівка (зерно) досягає остаточних розмірів в довжину, до настання молочної стиглості.

XI етап органогенезу співпадає з фазою молочної стиглості.

XII етап починається з переходом рослин до фази воскової стиглості, а закінчується повною стиглістю зерна. На X-XII етапах органогенезу остаточно визначається кількість повноцінних зерен в колосі. Підрахунок їх проводиться двічі: 1) на початку X етапу підраховується кількість зерен, що зав'язалися, 2) на XII етапі – кількість зерен, що сформувалися (озерненість колоса). Одночасно підраховується і кількість озернених

колосків.

2.2 Методи вивчення росту рослин

2.2.1 Особливості ростових процесів

Основоположник (науки) вчення про ріст рослин Ю. Сакс розумів під цим процесом збільшення об'єму рослин, зумовлене зміною їх форми. Майже такої ж думки дотримувався і В. Ротер в Росії, який визначав ріст "як остаточне, незнищуєме збільшення об'єму рослин".

По Д.А. Сабініну ріст – це процес новоутворення елементів структури організму, до яких відносяться органи, клітини, частини клітин і, нарешті, субмікроскопічні компоненти протоплазматичних структур до макромолекул включно.

Ріст можна визначити як процес диференційовки структури організму за рахунок утворення нових і збільшення старих його елементів (молекул, органел, клітин, тканин та органів), який впливає вирішальним чином на розподіл, перерозподіл і використання органічних речовин, що утворюються при фотосинтезі та метаболізмі, а також поглинених мінеральних солей і води, які йдуть на утворення нових органів і тканин, їх регенерацію і на запасне відкладення.

Згідно робіт В.С.Шевелухи основні особливості ростових процесів зводяться до наступних положень.

1. *Інтегральність, або підсумовуючий характер росту*, виражає фізіологічний стан рослин в цілому (загалом). Через нього реалізуються спадкові можливості в формуванні всіх органів, анатомічних і морфологічних структур. У ростових процесах переломлюється також вплив умов середовища на морфогенез рослин, на їх фенотипічну мінливість. Рівнодіючою внутрішніх (спадкових) і зовнішніх (екологічних) чинників в їх впливі на ріст і є величина його показників, що визначають в кінцевому результаті розміри, форму і структуру рослин і ценозів. Складність та інтегральність росту зумовлені також його безпосереднім зв'язком з багатьма фізіолого-біохімічними та біофізичними процесами. У свою чергу, інтегральна природа ростових процесів являється однією з головних причин високої їх чутливості до коливань зовнішніх і внутрішніх чинників, що призводить до порушення первинних ланок росту. Інтегральний характер росту робить його високоінформативним, особливо в частині рівня адаптивних можливостей рослини майже на всіх етапах органогенезу.

2. *Параболічний хід* зміни інтенсивності та зміни інтегральних показників, що описуються S-образною кривою росту рослин та їх органів в онтогенезі. Цей загальний закон росту розповсюджується на всі

біологічні об'єкти і системи та визначає основну якісну його характеристику у часі.

3. *Генетична, гормональна і екологічна обумовленість* інтенсивності, маштабності, просторової локалізації і спрямованості росту виражається залежністю його показників від внутрішніх чинників розвитку та умов росту рослини.

4. *Висока міра чутливості* ростових процесів до коливань напруженості зовнішніх і внутрішніх елементів погоди, фізичних полів, фізіолого-біохімічних та біоелектричних потенціалів і градієнтів в рослині. Ця властивість складної природи росту відображає великі адаптивні можливості рослин до умов середовища, які міняються і може бути з успіхом використана для їх оптимізації при вирощуванні.

5. *Велика лабільність***,** рухомість основних показників росту рослин зумовлена його високою чутливістю до коливань зовнішніх умов і внутрішніх чинників.

6. *Відносно широкий діапазон пристосовуючих ростових реакцій (широка норма реакцій), що* зумовлене спадковими біофізичними і біохімічними особливостями клітин, що забезпечують протікання всіх процесів життєдіяльності, в тому числі і росту, в досить широких для кожного виду рослин, граничних температурних, світлових та інших умовах.

7. *Певна локалізація і послідовність* ростових процесів у часі і просторі, які визначаються каскадним характером генної регуляції, спостерігаються в рослинах, ценозах у всіх кліматичних зонах земної кулі. Ці процеси зумовлені спадковою програмою організму, поєднанням зовнішніх і внутрішніх чинників, кліматичними особливостями географічних поясів.

8. *Саморегуляція росту* чітко виявляється:

– у віковій мінливості його маштабності, інтенсивності, спрямованості та локалізації;

– в законі великого періоду росту рослин та їх органів, відкритому Ю. Саксом;

– в ендогенній добовій та пульсуючій періодичності та ритмічності;

– в здатності рослин порівняно швидко відновлювати порушений впливом коливань різних чинників рівень ростових процесів. Саморегуляція це найважливіша властивість всіх основних функцій біологічних об'єктів, і ріст в цьому відношенні не є винятком.

9. *Нерівномірність часового ходу, періодичність (ритмічність) і аперіодичність росту виявляються* в закономірних або випадкових змінах показників інтенсивності росту у часі. Вони зумовлені генетично закріпленою еволюційною пристосованістю рослин до закономірно або випадково коливаючим умовам існування з сезонними, добовими,

часовими і мікрочасовими періодами. Екзогенні коливання росту регулюються зовнішніми чинниками середовища, ендогенні – «біологічними годинами», інтенсивністю нуклеїнового і білкового синтезу, темпами утворення, накопичення та активністю ферментних та ізоферментних систем, фітогормонів та інших продуктів метаболізму.

10. *Регуляторна функція росту в онтогенезі і морфогенезі* рослин виявляється в його впливі на швидкість та спрямування метаболічних процесів синтезу, розпаду, пересування і відкладення органічних сполук та інших речовин, в їх розподілі і реутилізації під впливом атрагуючого впливу ростових органів – могутніх центрів споживання речовин.

11. *Висока міра кореляції показників росту з параметрами продуційного процесу і ходу формування урожаю посівами***,** що дозволяє використати їх як тести при організації агрономічного контролю і програмуванні урожаю.

Перераховані основні особливості ростових процесів є найбільш загальними для рослин і виявляються на всіх рівнях організації біологічних систем – молекулярному, клітинному, організменному, популяційно-видовому і біосферному.

2.2.2 Ауксанографічний метод

У біології і рослинництві для вивчення росту рослин як функції часу необхідно застосовувати такі методи дослідження, які б забезпечували отримання безперервної інформації хоч би по одному з основних його показників. Таким вимогам відповідають методи ауксанометрії і ауксанографії, запропоновані Ю. Саксом ще в кінці XIX століття (ауксанометр від грецького *auxano* - росту і *metreo* - міряю).

У 1870 р. Ю. Сакс сконструював перший автоматичний прилад для запису часових приростів рослин у висоту в лабораторних умовах, який він назвав ауксанометром. Прилад складався із штатива 1 з підтримуючим блоком 2, нитки 3 з вантажем 4, годинникового механізму 5 і барабана 6, що обертається на ексцентричній осі (рис. 2.3). На одній із сторін барабана прикріплялася закопчена смужка паперу, на якій гострий кінець стрілки 7, сполученої з блоком 2, креслив через часові проміжки горизонтальні лінії. Барабан робив один оберт за годину, а відстані між лініями на покритому сажею папері відповідали збільшеним в декілька разів часовим приростам рослин у висоту. Датчиком висоти в приладі служили прикріплений до верхівки рослини крючечок або петля нитки, перекинутої через блок, яка натягується за допомогою вантажу. Результати відразу ж обробляли або робили копію на іншому папері, оскільки зберегти отримані ауксанограми було неможливо.

Незважаючи на те, що ауксанометр показував лише часові прирости рослин у висоту, заслуга Ю. Сакса полягає в тому, шо він дав фізіологам новий в той час метод вивчення росту рослин і перші ауксанометри, які сконструював для цих цілей. Ю. Саксу належить також першість у відкритті добової періодичності росту рослин, яку він пояснив добовою періодичністю сонячного освітлення.

На основі ауксанометричного методу були створені різні системи ростомірів і датчиків росту для безперервної автоматичної реєстрації лінійних розмірів рослин і їх органів.

Лабораторно-польові ауксанографи. В.С. Шевелухою сконструйовані різні типи механічних лабораторно-польових ауксанографів.

Ауксанографи для реєстрації росту надземних органів рослин. Модель 1 цього приладу (рис. 2.4) складається з остова – дюралевої або стальної труби *1* з діаметром 35-45 мм і висотою від 1500 до 2000 мм в залежності від висоти рослин, що вивчаються. Остов жорстко кріпиться на стальному диску *2* діаметром 300 мм і товщиною 3 мм, до корпусу пригвинчені три стальних ґрунтозацепи *3* довжиною по 150 мм.

На остові змонтовані приладовий столик *4*, чотири телескопні кронштейни *7* з підтримуючими блоками і чотири кронштейни з пружинними утримувачами рослин *10*. Приладовий столик розміром 450×450 мм виготовлений з листа нержавіючої сталі товщиною 1-2 мм. Краї столика відігнуті вниз для придання йому жорсткості і безперешкідного стоку опадів. На столику змонтовані чотири самописці, що складаються з кронштейнів *6* з блоками і перами *13*, конічних втулок, осей і годинникових механізмів з добовим ходом барабана *5*. Кронштейни з блоками і перами самописців можуть пересуватися по прорізах *14* в приборному столику та закріплятися в необхідному положенні. Таке регулювання в поєднанні зі збільшенням або зменшенням довжини стрілок пера *9* самописців необхідне для зміни міри збільшення фактичних приростів при їх записі на стрічках приладів. Приладовий столик разом з самописцями можна пересувати у вертикальній площині та навколо осі приладу і фіксувати в будь-якому положенні, що дає можливість використовувати прилад для вимірювання рослин різної висоти при різних способах розміщення їх на площі.

Телескопна конструкція всіх кронштейнів з підтримуючими блоками і утримувачами рослин ауксанографа та можливість їх переміщення в горизонтальній і вертикальній площині служать тій же меті – високій маневреності при використанні приладів на посівах. Всі блоки *15* виготовлені з дюралюмінію і насаджені на бронзові втулки. Діаметр блоків 50 мм, товщина 3 мм. По колу в блоках зроблена канавка глибиною 2 мм для тросиків.

Для одночасної реєстрації росту декількох листків (або пагонів) на самописці є пристосування у вигляді системи блоків зі стрілками і перами, розміщеними на загальній осі (рис. 2.4, а).

Датчиком зміни висоти рослин і довжини їх органів в приладі є невеликий металевий затиск *12* з гумовими прокладками, який прикріпляється до верхівки органу рослини, який росте. Від затиску ростові рухи передаються через стальний дріт *8* і систему блоків на перо самописця. Відношення довжини важеля з пером до радіуса блоку складає міру збільшення фактичних приростів при їх записі ($I=L/R$). До другого, вільного кінця тросиків прикріплюються грузики *11* масою 10 г і більш в залежності від міцності органів і потужності розвитку рослин. Грузики створюють натягнення тросиків і забезпечують стійку роботу самописців. До датчиків прикріпляються противаги меншої (на 10-20 г) маси з тим, щоб зменшити можливе розтягнення органів рослин.

Були виготовлені два модернізованих типи ауксанографів для реєстрації росту надземних органів рослин: один – для лабораторно-польових; другий – для лабораторних досліджень.

У приладі першого типу замість столика використали корпуси від термо- і гігрографів, які закріпили за допомогою кронштейнів на основі приладу. На осі пера самописця поставили додатковий ричажок з 3-4 отворами або блочок. Кратність збільшення запису фактичних приростів міняли за рахунок зміни блоків або місця прикріплення тросиків. Всі інші деталі ауксанографа цього типу не мають принципових відмінностей від основної моделі. Перевагою його є велика маневреність самописців при виборі положення для їх фіксації біля рослини.

Другий тип модернізованої моделі являє собою просту конструкцію, що складається з лабораторного штатива, на якому за допомогою кронштейнів змонтовано декілька самописців. Самописці складаються з основи, барабанів з годинниковими механізмами, осей з утримувачем пера і кронштейнів з підтримуючими блоками. Прилад має невеликі розміри (висота 60-70 см) і призначений для роботи в камері штучного клімату і в лабораторії. У цих умовах він дозволяє чітко і стабільно реєструвати ріст рослин.

Точність роботи ауксанографів моделі 1 при записувані лінійних приростів рослин досягає 0,1-0,05 мм, точність запису у часі при добовому ході барабана становить 0,5-1,0 хв. При використанні годинникових механізмів з 30-ти хвилинним ходом барабана точність підвищується до декількох секунд. До приладу одночасно можна підключати дві або чотири рослини в залежності від типу приладу – з двома або чотирма самописцями. Заміну стрічок і заправку пера мастикою проводять в польових умовах з 8 до 9 годин ранку, коли період помітних змін метеорологічних чинників минув, і різкі коливання росту вже зафіксовані.

У залежності від виду рослин і швидкості їх росту 2-5-ти кратне збільшення фактичних приростів являється достатнім.

Ауксанограф моделі 1 застосовують для запису росту рослин всіх польових культур. Особливу обережність потрібно проявляти при підключенні затисків до таких рослин як льон, коноплі, картопля, бобові та ін., не допускаючи при цьому затиснення точок росту. Ауксанограф дає порівняно стійкий і чіткий запис росту рослин у польових і лабораторних умовах.

Ауксанографи для реєстрації росту коренеплодів. Модель 2 (рис. 2.5) складається з стальної основи *1* товщиною 2 мм і розміром 485×195 мм. За допомогою гострих конічних стержнів *2* прилад міцно закріпляється на поверхні ґрунту біля рослини таким чином, щоб коренеплід розміщувався у вирізі його основи.

Ауксанограф реєструє зміни окружності коренеплоду *5* на рівні найбільшого його діаметра. Датчиком росту є стальний дріт *6* покритий хлорвініловим чохлом, щоб вона не врізалася в тканину коренеплоду. Один кінець дроту вставляється в отвір вертикального стояка *3* і міцно закріпляється в ній стопорним гвинтом *4*. Стальний вертикальний стояк *3* може мати різні габарити і різну кількість отворів з таким розрахунком, щоб можна було пристосувати ауксанограф для запису росту коренеплодів з неоднаковими розмірами і формою. Стояк має висоту 1·15 мм і поперечний перетин 10×10 мм. Дріт намотують навколо коренеплодів (не більше одного обороту), вільний кінець її вкладають в канавку підтримуючого диска *8* і закріпляють в одному з отворів двоплечового важеля *12*. Підтримуючий диск виготовляють з дюралюмінію або сталі, він має діаметр 38-40 мм, товщину 2,5 мм; глибину канавки 2 мм. Диск з бронзовою втулкою вільно обертається на стальній осі *7* висотою 120 мм і діаметром поперечного перетину 8 мм. Опорна втулка зі стопорним гвинтом *9* і гвинтом муфти кріплення *10* фіксує підтримуючий диск на необхідній висоті.

Двоплечий колінчастий важіль *12,* до якого прикріпляється другий кінець стального дроту, вільно обертається навколо осі повзунка *14* у вертикальній площині. Повзунок при необхідності можна переміщувати по прорізу стойки 11 і фіксувати на певній висоті. На горизонтальному плечі цього важеля приварена втулка зі стопорним гвинтом *16,* в яку вставляється і фіксується в ній трубка-важіль з пером *17* для запису росту коренеплоду на стрічці барабана *26.* На вертикальному плечі важеля *12* є п'ять отворів для закріплення другого кінця дроту *13.* Змінюючи місце закріплення дроту на висоті двоплечого важеля і міняючи довжину стержня з пером самописця, переміщуючи його у втулці *15,* можна збільшувати показники фактичних приростів коренеплоду в товщину в 5-30 разів. Вертикальна стойка *11* має висоту 125 мм, поперечний перетин

14×14 мм і ширину прорізу 8 мм. На стержні *17* пересувається та фіксується в необхідному положенні і вантажна втулка *19* масою 25-50 г, за допомогою якої створюється натягнення дроту, обвитого навколо коренеплоду. Пружиною *18* важіль *17* з пером постійно притискається до поверхні стрічки самописця.

Годинниковий механізм з добовим ходом барабана вміщений на осі *27,* закріпленій на стальній пластинці *25,* яка може пересуватися у вертикальному напрямі разом з барабаном по прорізу стойки *23* і фіксуватися в потрібному положенні стопорним гвинтом *24.* Горизонтальне переміщення барабана здійснюється шляхом пересування пластини *21* по прорізу *20* в основі приладу. Стопорним гвинтом *22* можна закріпляти положення цієї пластини.Така конструкція основних вузлів самописця дозволяє легко пристосовувати прилад до різних за розмірами та формою коренеплодів. При вивченні росту коренеплодів, повністю заглиблених в ґрунт (цукровий та кормовий буряк, морква, бруква, цикорій), ауксанограф необхідно трохи заглибити в ґрунт, щоб датчик розміщувався на рівні шийки коренеплоду. Прилад захищається від опадів поліетиленовим чохлом. Зміну ауксанограм та заправлення пера мастикою при роботі в полі також найкраще проводити щодобово з 8 до 9 годин ранку. Прилад працює безвідмовно і стійко. Запис проводиться дуже чітко, без всяких перешкод.

Модель 3 для реєстрації росту коренеплодів. У цієї моделі ауксанографа механічний датчик виконаний у вигляді металевих «вусів» – двох дугоподібних стержнів, що охоплюють з обох сторін коренеплід на рівні його найбільшого діаметра. Пружина постійно притискує стержні до поверхні коренеплоду. Форма стержнів датчика росту та їх положення під час дослідів можуть бути різними в залежності від розмірів і форми коренеплодів.

Цю модель ауксанографа краще використовувати при реєстрації росту коренеплодів з невеликим діаметром (до 40-45 мм) і при загущенні рослин в рядках. Такі ауксанографи в багаторічних дослідах також зарекомендували себе добре. Вони забезпечують чітку та стійку реєстрацію ростових процесів.

Ауксанограф для реєстрації росту бульб картоплі та інших рослин. Модель 4. За допомогою ауксанографа моделі 4 можна реєструвати ріст бульби в товщину, довжину або ширину. Датчиком цих показників є металеві ножиці, що складаються з рухомого і нерухомого важеля. За допомогою чотирьох металевих ґрунтозацепів прилад міцно фіксується в ґрунті біля рослин.

За допомогою ауксанографів моделей 1 і 4 одночасно можна реєструвати ріст надземних органів і бульб у картоплі. При підключенні по три-чотири ауксанографа до однієї рослини в дослідах можна вивчати

співвідношення між ростом різних за віком і розміром бульб одного гнізда. Як і попередні моделі, прилад працює безвідмовно і дає точний запис часового ходу ростових процесів у бульб картоплі.

Лазерні інтерференційні ауксанометри (ЛІНА-ЕМ2, ЛІНА-ЕМЗД) створені в Центральній генетичній лабораторії ім. І.В. Мічуріна. Авторами приладів є В.І. Гуляев і Л.А. Чуча. Ауксанометри призначені для вимірювання ростової реакції рослини на вплив фізико-хімічних та інших чинників і можуть бути використані для експрес-аналізу їх дії на об'єкт, що вивчається. Прилади складаються з лазера типу ЛГ-78 (джерело монохромного випромінювання), інтерференційного модуля, фотоелектричного перетворювача, блоку індикації, блоку цифроаналогових перетворювачів, багатоканального аналогового реєстратора і блоку живлення.

Лазерний інтерференційний ауксанометр (диференціальний) відрізняється від моделі ЛІНА-ЕМ2 більш широкими функціональними можливостями. Він дозволяє провести реєстрацію росту в умовах усадки ґрунту, яка виникає при внесенні в неї водних розчинів різних біохімічних чинників; забезпечує автоматизацію процесу перестановки, що робить можливими безперервні цілодобові вимірювання; має автономний блок цифрової індикації, що включає в себе томометр, таймер, вимірників швидкості росту та величини приросту рослини. Він забезпечений блоком сполучення з аналоговим реєстратором. Чутливість приладу 0,07 мкм на один відлік. Такі прилади використовуються тільки в лабораторних дослідженнях.

Поки ще не створені прилади, автоматично реєструючі показники зміни маси рослин. Тому основна увага приділяється вивченню лінійних характеристик росту, враховуючи те, що між динамікою лінійних і виражених в масі показників є висока степінь кореляції

2.2.3. Формалізація ростових процесів рослин

Ріст, як і всі інші процеси в рослині, є функцією часу, що зовні виражається в періодичних і ритмічних коливаннях його інтенсивності, а також в змінах його маштабності, спрямованості та локалізації. Найбільш загальним вираженням залежності ходу ростових процесів у часі від внутрішніх причин, їх спадковості та фізіолого-біохімічного стану є сформульований Ю. Саксом в 1856 р. закон великого періоду росту, відображаючий S-образний хід кривої інтегрального наростання розмірів або маси рослин і параболічний хід диференціальної кривої приростів величини збільшення маси за певний період.

Три послідовні гілки S-образної кривої росту можуть бути виражені рівняннями першого і другого порядків:

1) нижня висхідна гілка виражається рівнянням геометричної прогресії або близькою до неї формулою експонентної кривої $y = ax;$
2) середня, пряма частина – рівнянням лінійної функції $y = mx+b$;
3) верхня низхідна гілка – рівнянням логарифмічної функції $y = log\ a^x$.

Початок і кінець росту також протікають згідно із законом лінійної функції. Зміна приросту маси рослин у часі при оптимальних умовах середовища відбувається по типу параболічної функції $y = \pm\sqrt{2p}$.

Враховуючи ці закономірності росту, а також наявність функціональної залежності між ростом, часом і масою (або розмірами) рослини, багато які дослідники застосовують математичні методи опису ростової динаміки і на цій основі шукають шляхи прогнозування темпів росту та формування урожаю. Так, В. Х. Блекман виразив ріст рослин рівнянням складних процентів:

$$\frac{d\omega}{dt} = KW, \qquad (2.1)$$

де W – маса або розмір рослини;
t – час росту;
K – коефіцієнт пропорціональності.

У основу цієї формули покладено уявлення про здатність кожної одиниці маси організму (старої і новоутвореної) збільшуватися за одиницю часу на певний процент K. Після інтегрування цього рівняння воно має вигляд:

$$W_t = W_o\, e^{rt}, \qquad (2.2)$$

де W_t – маса або розмір рослини через інтервал часу;
W_o – початкова маса при $t = 0;$
e – основа натуральних логарифмів;
t – час;
r – середній процент росту маси або розмірів рослини (питома швидкість росту).

Д.А. Сабінін високо оцінив цю спробу Блекмана описати ріст математично, але вказував на вельми обмежену застосовнність цього рівняння, бо величина r, як відомо, не залишається постійною навіть при одних і тих же умовах середовища. Апріорно цей висновок витікає із закону великого періоду росту Ю. Сакса, що підтверджено в експериментах Ф. Кидда, Ц. Веста і Е. Бріггса на соняшнику. Вони знаходили значення r шляхом логарифмування рівняння Блекмана

$$r = \frac{\log W_1 - \log W_o}{t \log e} \qquad (2.3)$$

Однак і рівняння Блекмана описує лише експонентну частину сигмовидної кривої росту і до того ж не враховує впливу на ріст умов навколишнього середовища.

Т.В. Робертсон запропонував описувати динаміку росту рівнянням автокаталітичних реакцій:

$$\frac{dW}{dt} = K_1 N(A - W), \qquad (2.4)$$

де K_1 – емпірична константа;

W – маса або розмір рослини;

A – кінцева величина, що досягається при рості.

Після інтегрування рівняння приймає вигляд:

$$K = \frac{1}{t - t_1} \log \frac{W}{A - W}, \qquad (2.5)$$

де $W = 1/2\ A$.

Застосувати практично ці рівняння неможливо, оскільки треба знати дві істотні величини A і $1/2A$. Припущення Т.В. Робертсона про те, що гальмування росту при наявності достатньої кількості початкових продуктів є результат взаємодії автокаталітично діючих продуктів росту, експериментально не доведене. Тому його рівняння можуть бути застосовані лише для визначення проміжних точок на сигмовидній кривій росту, між A і $1/2A$, і тільки при постійних умовах середовища.

І.І. Шмальгаузен розробив теорію параболічного росту для вираження ембріонального росту тварин за допомогою наступного рівняння:

$$z = z_o t^k, \qquad (2.6)$$

де z – маса ембріона на задану дату;

z_o – початкова маса ембріона при $t = 0$;

t – час росту;

k – емпіричний коефіцієнт.

Математичну інтеграцію закону великого періоду росту дає також Г.З. Вінцкевич. Він вводить уявлення про три етапи росту: перший – вся біомаса складається тільки з активних елементів ($z = ma$); другий – нарівні з активними елементами виникають консервативні, незростаючі елементи

($z = ma + mk$), третій – коли залишаються майже тільки одні консервативні елементи ($z = mk$). На основі цих уявлень, використовуючи формулу Блекмана, що виражає експоненційний ріст Г.З. Вінцкевич запропонував свої рівняння сигмовидної кривої росту і методи розрахунку її констант.

Принципіально нове балансове рівняння, яке зв'язує фотосинтез і дихання з накопиченням загальної сухої фітомаси, було запропоновано Л.О. Івановим

$$M + \Delta m_{on} = \Phi L \tau - R M_1 \tau_1, \qquad (2.7)$$

де M – суха маса всієї рослини за розглядаємий період;

Δm_{on} – маса відмерлих та опавших частин органів за цей час;

Φ – інтенсивність фотосинтезу;

L – площа асимілюючої поверхні органів;

τ – тривалість світлого часу доби;

R – інтенсивність дихання;

M_1 – маса органів

τ_1 – час дихання.

Рівняння Іванова показує, що урожай визначається балансом фотосинтезу і дихання, тобто газообміном. Крім того, це рівняння враховує роль асимілюючої поверхні та її впливу на формуванні врожаю. Таким чином, рівняння (2.7) стало основою для якісно нового етапу в кількісному описі росту рослин.

Розглядаючи ріст як підсумковий процес, що відображає баланс речовин при фотосинтезі та диханні, І.Л. Давідсон і І.Р. Філіпп запропонували наступне рівняння росту:

$$\frac{dM}{dt} = \varepsilon(\overline{\Phi} - \overline{R}), \qquad (2.8)$$

де M – суха біомаса;

$\overline{\Phi}$ – сумарний фотосинтез;

$\overline{R}$ – сумарне дихання рослини;

ε – емпіричний коефіцієнт пропорціональності між кількістю засвоєного CO_2 і накопиченою біомасою.

Істотним кроком в розвитку математичного описування росту явились роботи Ю.К. Росса. Його система рівнянь росту послужила основою для інтенсивного розвитку динамічного моделювання продуційного процесу і стала на даний час загальновизнаною. Система диференціальних рівнянь Росса для опису роста органів рослини має вигляд:

$$\frac{DM_j}{dt} = \varepsilon_\Phi \sum_{i=1}^{4} A_{ij}\overline{\Phi}_{ci} - \varepsilon_R \overline{R}_{ci} - V_j + M\sum_{i=1}^{4} B_{ij}, \qquad (2.9)$$

де i та j – органи рослини (i =1 - листя, i=2 - стебла, i=3 - корені, i=4 - репродуктивні органи);

m_j – суха маса органа j;

ε_Φ – коефіцієнт ефективності фотосинтезу;

ε_R – коефіцієнт ефективності дихання;

$\overline{\Phi}_{ci}$ – сумарний фотосинтез органа i за добу;

$\overline{R}_{cj}$ – сумарне дихання органа j за добу;

V – втрати сухої фітомаси за добу внаслідок її опаду;

M – сумарна суха маса рослин;

A_{ij} – частка утворених за добу в i -му органі рослини "свіжих" асимілятів, які перетікають на протязі доби в j-ий орган;

B_{ij} – обмін "старих" асимілятів між i-м та j-м органами, віднесений до одиниці сухої фітомаси всієї рослини.

A_{ij} і B_{ij} подаються у вигляді "ростових матриць". У спрощеному випадку, коли основними синтезуючими органами являються листя, замість ростових матриць для періоду вегетативного росту розглядаються функції вегетативного росту A_j , а для періоду репродуктивного росту – функції репродуктивного росту або так звані функції притоку – відтоку B_j.

Рівняння росту для j-го органу тоді записується так:

$$\frac{\Delta m_j}{\Delta t} = A_j \frac{\Delta M}{\Delta t} + MB_j, \qquad (5.10)$$

де $\sum A_j = 1$ та $\sum B_j = 0$.

В роботі Х.Г. Тоомінга рівняння Росса трохи модифіковане. Включивши в рівняння (5.10) замість $\Delta M/\Delta t$ добовий газовий обмін посіву, він одержав слідуюче рівняння

$$\frac{\Delta \tilde{m}_j}{\Delta t} = \varepsilon A_j(t)\left[\int_t^{t+1}\int_0^{L_0(t)} (\Phi_1 - R_1)\,dL\,d\tau - \sum_{i=2}^{n} \overline{R}_{ci}\right] + MB_j \qquad (2.11)$$

де $\sum_{i=2}^{n} R_{ci}$ – сумарне за добу дихання всіх органів, крім листя;

t – тривалість світлого часу доби.

Виходячи з припущення, що відтік асимілятів із j-го органа пропорційний масі живої частини $\tilde{m}_j$ цього органа, Є П. Галямін

запропонував функцію репродуктивного росту визначати за виразом:

$$b_j = \frac{\Delta m_j}{\Delta t}\frac{1}{\tilde{m}_j} \tag{2.12}$$

де $\tilde{m}$ – біомаса, в складі якої є компоненти, що здійснюють і регулюють обмін речовин, названа А.М. Польовим *функціонуючою біомасою.*

Її кількість оцінюється згідно робіт А.М. Польового на основі використання універсального закону старіння біологічних систем. Для періоду активного росту рослини вся біомаса є функціонуючою, отже приріст загальної і функціонуючої біомаси одинаковий

$$\frac{\Delta \tilde{m}_j}{\Delta t} = \frac{\Delta m_j}{\Delta t} \geq 0\,. \tag{2.13}$$

При виникненні стресових умов або при старінні рослин, коли кількість загальної біомаси знижується внаслідок переваги процесів розпаду над процесами синтезу, зміна кількості функціонуючої біомаси знаходиться за виразом

$$\frac{\Delta \tilde{m}_j}{\Delta t} = -\left(\frac{\Delta m_j}{\Delta t}\frac{1}{k_s}\right). \tag{2.14}$$

де k_s – параметр, що характеризує долю життєдіяльних структур в загальній біомасі органа.

Для описання динаміки росту сухої біомаси окремих органів А.М. Польовим запропонована слідуюча система рівнянь:

$$\frac{\Delta m_i^j}{\Delta t} = \frac{\beta_i^j \Phi^j}{1 + c_{Gi}} - \frac{(\alpha_{Ri}^j c_{mi} \varphi_R^j + \vartheta_i^j)\tilde{m}_i^j}{1 + c_{Gi}},$$

$$\frac{\Delta m_p^j}{\Delta t} = \frac{\beta_p^j \Phi^j}{1 + c_{Gi}} - \frac{\left(\alpha_{Rp}^j c_{mp} \varphi_R^j \tilde{m}_p - \sum_i^{l,s,r} \vartheta_i^j \tilde{m}_i^j\right)}{1 + c_{Gi}}, \tag{2.15}$$

$$\frac{\Delta m_g^j}{\Delta t} = \frac{\Delta m_{g_{\max}}^j}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta \tilde{m}_p^j / \Delta t}{k_g + \Delta \tilde{m}_p^j / \Delta t},$$

де $\frac{\Delta m_{i(p)}}{\Delta t}$ – приріст біомаси *i*-го вегетативного (репродуктивного) органа;

$\tilde{m}_{i(p)}$ – функціонуюча біомаса *i*-го вегетативного (репродуктивного) органа;

$\Delta m_g/\Delta t$ - приріст сухої біомаси зерна;

$\Delta m_{g_{\max}}/\Delta t$ - максимально можлива в реальних умовах швидкість приросту сухої біомасси зерна;

β_i – ростова функція вегетативного періоду;

ϑ_i – ростова функція репродуктивного періоду;

C_G – коефіцієнт дихання росту;

α_R – онтогенетична крива дихання;

C_m – коефіцієнт дихання підтримки;

φ_R – температурна крива дихання;

k_g - константа Міхаеліса-Ментен;

i – органи : *l* – листя; *s* – стебла; *r* – корені.

В межах генетичної норми реакції рослини у зв'язку з безліччю випадкових впливів, що не піддаються обліку, ріст його можна розглядати як ймовірносний процес. На цій основі В.Є. Перфільєв для характеристики динаміки росту сіянців яблуні застосував рівняння інтеграла імовірностей. Підставивши в це рівняння відповідні позначення, він запропонував наступну формулу, по якій розраховується висота сіянців на певну дату:

$$h = h_{\max} \frac{2}{\sqrt{2\pi}} S_{\infty}^{x - x^{2|2}} L dx, \qquad (2.16)$$

де h – висота рослини на задану дату;

h_{max} – висота рослини в кінці-вегетації;

x – визначається по формулі $x = (t - \bar{t})/S$, де t – кількість діб від висіву насіння до досліджуваної нами дати; $\bar{t}$ – кількість діб від сівби до досягнення рослиною $1/2h_{max}$);

S – статистичний параметр, що розраховується за допомогою емпіричної формули

$$S = \sqrt{\sum pc(t_c - \bar{t})^2 h_{\max}}, \qquad (2.17)$$

де pc – приріст висоти за відомий період часу;

$(t_c - \bar{t})$ – кількість днів між серединою цього періоду і датою досягнення рослинами $1/2h_{max}$.

Розраховані автором за цією формулою прирости повністю співпали з фактичними даними у 39,5 % випадків.

В.Є. Перфільєв запропонував також використати коефіцієнт асиметрії статистичних розподілів висоти рослин як показник при оцінці умов їх росту. Об'єктивною основою для такої пропозиції є той факт, що варіювання ознак і властивостей рослин, в тому числі і показників росту, визначається законом нормального розподілу, графічне зображення якого має вигляд симетричної одновершинної кривої, відомої під назвою кривої Гауса. Емпіричний розподіл показників росту часто відрізняється від нормального їх розподілу. Одна з причин такого відхилення – невідповідність умов росту даному виду рослини. У цьому випадку крива розподілів приймає асиметричний вигляд. По величині коефіцієнту асиметрії можна судити про те, наскільки умови вирощування підходять для даного виду або сорту рослини

$$A = \frac{M_з}{\sigma_з}, \qquad (2.18)$$

де $M_з$ – центральний момент 3-го порядку;

$\sigma_з$ - середнє квадратичне відхилення.

Привертає увагу спроба В.Г. Карманова і В.К. Вікторова вирішити математичними методами проблему оптимізації ростових процесів у рослин. При уявленні про ріст як про ряд клітинних ділень автори вивели рівняння росту, що нагадує формулу Робертсона:

$$\frac{dm}{dt} = a(u) - b(u)m^2, \qquad (2.19)$$

де m – математичне очікування розміру (маси) ростового утворення;

u – чинник, що вивчається;

a і b – коефіцієнти.

Методом динамічного програмування з використанням цієї формули знаходиться залежність, по якій необхідно міняти значення чинника у часі, щоб отримати максимальний ріст, адже відомо, що не завжди максимальний ріст найбільш доцільний у господарському відношенні, так, наприклад, у разі росту у висоту нестійких до вилягання рослин.

І. І. Шмальгаузен розробив теорію параболічного росту для вираження ембріонального росту тварин за допомогою наступного рівняння:

$$z = z_o t^k, \qquad (2.20)$$

де z – маса ембріона на задану дату;

z_o – початкова маса ембріона при $t = 0$;

k – емпіричний коефіцієнт.

Математичну інтеграцію закону великого періоду росту дає також Г.З. Вінцкевич. Він вводить уявлення про три етапи росту: перший – вся біомаса складається тільки з активних елементів (z = *ma);* другий - нарівні з активними елементами виникають консервативні, незростаючі елементи (*z = ma + mk), третій* – коли залишаються майже тільки одні консервативні елементи (*z = mk*). На основі цих уявлень, використовуючи формулу Блекмана, що виражає експоненційний ріст Г.З. Вінцкевич запропонував свої рівняння сигмовидної кривої росту і методи розрахунку їх констант.

В.М. Шмідт і М.Д. Дибіров описують ріст таким рівнянням

$$Y_K(x) = A\left(1 - \frac{e^a + \delta x}{K}\right)K, \qquad (2.21)$$

де A – остаточний розмір рослини і органу;

x – час з початку росту;

a і b - константи, що визначають кут нахилу, форму і точку перегину кривої росту; при цьому $\delta > 0$;

K – будь-яке дійсне число.

Тип кривої залежить від величини параметра K. При $K = -1$ і $K = 1$ функція приймає вигляд відповідно логістичної і експонентної кривої; якщо $-1<K$, 1, $K<-1$ – області існування кривих інших типів. Ця формула описує середньостатистичний процес росту і не може бути використана для прогнозування його реального ходу або для корекції продуційного процесу при програмуванні урожаю.

Останнім часом все більше значення і поширення отримують методи моделювання процесів росту, розвитку, продуційного процесу і ходу формування урожаю з використанням електронно-обчислювальної техніки. Вирішальною умовою ефективності таких методів є відбір найбільш інформативних, тісно корелюючих з продуційним процесом динамічних показників, кількість яких повинна бути мінімальною і в той же час достатньою для практичних цілей моделювання і прогнозування формування урожаю.

2.2.4 Коливальні процеси в біологічних системах та добова періодичність росту озимої пшениці

Ріст рослин – це коливальний процес. Спадкові особливості, вікові та фізіолого-біохімічні зміни рослин, а також сезонні і добові коливання основних чинників середовища (температури, вологості, освітленості, рівня ґрунтового і повітряного живлення та ін.) викликають у них майже

безперервні і вельми значні зміни в інтенсивності, спрямованості, масштабності та локалізації ростових процесів.

Математичною основою робіт по вивченню коливальних процесів в біологічних (і хімічних) системах, як відомо, є теорія нелінійних коливань. У ній коливальні процеси поділяють на дві основні групи: автономні і неавтономні. Під автономними коливаннями розуміються такі, закономірний хід яких виражається диференціальним рівнянням, що не містить у явному вигляді показника часу t (t *може* входити в рівняння тільки під знаком похідної). Неавтономні, або вимушені, коливання викликаються впливом на процес або систему непостійного, джерела енергії, що залежить від часу. З урахуванням характеру впливу, що надається на коливальну систему, коливання поділяють на: 1) вільні (або власні); 2) вимушені; 3) параметричні і 4) автоколиванння.

Вільні (або власні) коливання виникають в системі після того, як їй був наданий імпульс енергії. Вимушені *коливання виникають* в системі і підтримуються в ній під впливом зовнішньої сили, що періодично змінюється. Автоколивання, як і вимушені, викликаються і підтримуються під впливом зовнішніх сил, однак, момент часу для подачі енергетичних імпульсів задається і регулюється самою коливальною системою. При параметричних *коливаннях відбувається* періодична зміна якого-небудь параметра системи. І автоколивання, і вимушені коливання фізіологічних процесів у рослин можуть виникати під впливом внутрішніх (ендогенних) причин і зовнішніх (екзогенних) чинників.

Головним критерієм ендогенності ритму, по Е. Бюннінгу і Ю. Ашоффу, є його збереження хоч би протягом деякого часу в константних умовах середовища. При цьому довжина періоду і тимчасове положення фаз на кривій не повинні бути строго постійними. Вони можуть мати незначні відхилення будь-якого знаку. Довжина періоду ендогенних ритмів не співпадає з періодом коливань зовнішніх чинників середовища, в той час як для экзогенних ритмів ця умова є строго обов'язковою.

Як і всякий коливальний процес, ріст характеризується. такими показниками, як довжина хвилі l, період T, частот*а* υ і амплітуда A коливань. У залежності від ходу цих показників у часі ріст може бути періодичним, якщо його період T залишається постійним у часі, і аперіодичним, якщо цей показник є змінним. Строго кажучи, тільки періодичні процеси можна називати ритмічними. Однак, в біологічній літературі дуже часто під ритмами і періодичністю процесів розуміють і такий їх хід у часі, при якому період T необов'язково повинен залишатися постійною величиною.

Коливання можуть бути затухаючими і незатухаючими в залежності від надходження енергії. Незатухаючі автоколивання можуть бути лише

при постійному, безперервному або імпульсному надходженні енергії в систему.

Коливальні процеси за формою хвилі можуть бути самими різноманітними (рис. 2.6). Найбільш прості з них *гармонічні*, або *синусоїдні* коливання, характерна величина яких описується наступним рівнянням

$$x = x_o \sin(\omega t - \alpha) \qquad (2.22)$$

де x – величина зміщення (або інший показник);

t – час;

x_o – амплітуда коливань;

ω – кругова частота;

α – фазова постійна (початкова фаза);

(ωt +α) – фаза.

Для *затухаючого гармонічного (*синусоїдного) коливання формула набуває вигляду

$$x = Be^{-\alpha t} \sin \omega t, \qquad (2.23)$$

де α – логарифмічний декремент загасання;

ω – кругова частота.

Криві добової періодичності росту деяких видів рослин мають форму, близьку до синусоїди, що дозволяє використати вказані вище рівняння для опису і характеристики росту цих рослин Періодичні коливання фізіологічних та інших процесів можуть мати також формулу *імпульсної* або *прямокутної* кривої, якщо зміна фаз у часі відбувається різко, під прямим кутом; *релаксаційної* кривої – при повільному її підйомі і різкому спаді (або навпаки). Спостерігаються також інші види кривих зміни інтенсивності ростових процесів: *кутової* хвилі (зміна фаз відбувається під кутом); комбінованої *імпульсно-синусоїдної*, *імпульсно-релаксаційної* та ін. Ці або близькі до них форми кривих також характеризують добовий хід росту окремих видів рослин.

У залежності від довжини періоду Е. Бюннінг виділив наступні типи ритмів фізіологічних процесів: 1) з довжиною періоду в декілька років; 2) річні; 3) з довжиною періоду в декілька місяців або тижнів; 4) добові або білядобові – циркадні; 5) приливні; 6) з коротким періодом.

При детальному вивченні росту та розвитку озимої пшениці виявлені ритми росту за допомогою фаз розвитку органів пшениці та показана залежність цього типу ритмів від етапів органогенезу, фізіологічного стану рослин і впливу зовнішніх умов. Дослідження добової динаміки росту різних органів пшениці при безперервній реєстрації його показників

виконувалось Шевелухою за допомогою ауксанографування пшениці в польових умовах.

Для прикладу був взятий сорт Миронівська 808 як високоврожайний і найбільш чуйний на добрива. А щоб більш детально виявити особливості росту цього сорту його порівнювали з менш продуктивним сортом ППГ-186. Вегетаційний період у озимої пшениці триває більш 300 діб. За цей час відбувається багаторазова зміна комплексів погодних умов. Рослини даних сортів можуть служити хорошою моделлю для виявлення широкого спектра екзогенних ритмів росту.

Загальні закономірності добової періодичності росту. На рис. 2.7 і 2.8 видно, що листя і стебла озимої пшениці на протязі доби ростуть у висоту нерівномірно, з певною періодичністю. У денні години спостерігається значний підйом інтенсивності росту, а в нічні, особливо в ранні ранкові години (з 4 до 6 год.), навпаки, ослаблення росту. У середньому швидкість росту пшениці вдень була в 1,5-2 рази вище, ніж в нічні та ранні ранкові години. Однак період коливань *T* швидкості росту мінявся при цьому незначно і майже дорівнював добі, що дозволяє вважати цю періодичність білядобовою або циркадною. За формою хвилі крива добового росту пшениці наближається до синусоїди. На ній виразно виділяються максимуми і мінімуми в рості, а також близька до синусоїди закономірна зміна значень між крайніми положеннями фаз. Відхилення кривих росту від синусоїди частіше за все приходиться на денні і особливо на полуденні години доби, коли закономірний підйом швидкості росту, зумовлений підвищеними температурами, змінюється випадковими його коливаннями протягом декількох годин. Такі коливання в рості пшениці на рис. 2.8 виражені менше.Пояснюється це тим, що представлені середні ауксанограми включають результати не тільки весняно-літнього періоду, але і тривалого осіннього періоду, що характеризується більш рівним добовим ходом температури і ростових процесів у пшениці. У вечірні, нічні та ранкові години доби таких коливань в ході росту на синусоїдній кривій спостерігається менше, ніж в денні.

Істотних відмінностей між двома сортами пшениці на довжину періоду і форму добової кривої лінійного росту в окремі роки не встановлено. Відмінності між ними виявляються головним чином у величині амплітуди коливань росту *A*.

Зіставлення добового ходу ростових процесів пшениці з динамікою основних елементів погодних умов показує, що в найбільшій мірі добовий хід ростових процесів пов'язаний з температурою. На всіх графіках між швидкістю ростових процесів і температурою у вечірні, нічні і ранкові години доби спостерігається майже пряма функціональна залежність. Коефіцієнт кореляції від 0,94 ± 0,11 до 0,98 ± 0,06 і лише в денні години вона порушується, особливо при температурі вище за 20 °С. Всім

переломам на температурній кривій за період з 20 години до 9 години наступної доби відповідають переломи ауксанографічних кривих, причому всі фази на обох кривих співпадають за часом. Виключення складають лише випадки з післядією тривалості знижених температур, яке частіше за все спостерігається вранці. Зменшення інтенсивності росту пшениці у вечірній час, як правило, відбувається повільніше, ніж її підйом в ранкові години, що зумовлено істотною різницею у величині ранкових і вечірніх температурних градієнтів. Так з 6 до 9 години ранку швидкість росту пшениці збільшується в середньому за весь період спостережень на 0,2 мм/год., а у вечері і вночі (з 20 до 24 годин) вона зменшується до 0,1 мм/год. Отже, прискорення росту (+α) пшениці вранці, в 2 рази перевищує величину його зменшення (-α) у вечірні години.

При зіставленні середніх ауксанограм добового ходу росту з динамікою відносної вологості повітря і тривалості сонячного сяйва можна встановити, що такої тісної кореляції, як між ростом і температурою, тут не виявляється. Основні фази цих кривих за часом не співпадають.

Середні ауксанограми росту дозволяють зробити лише припущення, що часткове порушення кореляції між швидкістю росту пшениці і температурою повітря в денні години, мабуть, зумовлене спільним впливом на ріст підвищених температур (вище за 20 °С) і високої інтенсивності сонячного сяйва (1,68-3,78 Дж·хв/см^2). Підтвердження для такого висновку можна знайти при аналізі інших відрізків цих же кривих, відповідних оптимальним умовам температури (18-20 °С) і зниженій інтенсивності сонячної радіації (менше за 0,4 кал·хв/см^2), коли кореляція залежності між швидкістю росту і температурними коливаннями значно посилюється.

Мінеральні добрива впливають на добову періодичність росту і кінцеву продуктивність рослин пшениці (див. рис. 2.7. і 2.8). У дослідах з добривам фон створювався за рахунок внесення під пшеницю $N_{60}P_{60}K_{60}$. З цих рисунків видно, що на удобреному фоні збільшувалася швидкість ростових процесів у озимої пшениці протягом всієї доби росту, однак найбільша різниця між варіантами спостерігалася вдень, при оптимальній температурі. На довжину періоду і форму кривої добової періодичності росту мінеральні добрива істотного впливу не надавали.

2.3 Визначення водного дефіциту листя

2.3.1 Поняття про водний дефіцит рослин

Внутрішній водний баланс рослин залежить від комплексу чинників, пов'язаних з:

а) самою рослиною (посухостійкість, глибина проникнення та розгалуження коріння, фаза розвитку);

б) кількістю рослин на даній площі – густота стояння;

в) кліматичними чинниками (втрати води на випарування і транспірацію, температура і вологість повітря, туман, вітер і світло, кількість опадів і т.д.);

г) ґрунтовими чинниками (кількість води в ґрунті, осмотичний тиск ґрунтового розчину, структура і вологоємність ґрунту та ін.)

Дефіцит вологи в рослинах впливає на такі процеси як: поглинання води, кореневий тиск, проростання насіння, продиховий (устячковий) рух, транспірація, фотосинтез, дихання, ферментативна активність рослин, ріст і розвиток, співвідношення мінеральних речовин та ін.

Вміст води в листі залежить від водного балансу рослини, тобто від різниці між кількістю поглиненої рослиною води і витратою води на транспірацію. Якщо витрати води на транспірацію перевищують її надходження, то виникає *водний дефіцит.* Під водним дефіцитом розуміють кількість води, якої не вистачає до повного насичення клітин, виражену в процентах від загального її вмісту при повному насиченні рослинної тканини. Водний дефіцит, що не перевищує 10 % являє собою нормальне явище, яке не заподіює рослині шкоди; водний дефіцит, який досягає 25 % і більше, несприятливо впливає на процеси життєдіяльності рослин.

Водний дефіцит може виникнути в жарку сонячну погоду до середини дня, при цьому збільшується сисна сила листя, що активізує надходження води з ґрунту. Рослини регулюють рівень водного дефіциту, міняючи відкритість устячок. Звичайно при зів'янені листя водний дефіцит їх відновлюється у вечірні і нічні години (тимчасове зів'янення). Глибоке зів'янення спостерігається при відсутності в ґрунті доступної для рослини води – це зів'янення частіше за все приводить рослини до загибелі.

Характерна ознака стійкого водного дефіциту є збереження його в тканинах вранці, а також припинення виділення пасоки (соку) із зрізаного стебла. Дія засухи насамперед приводить до зменшення в клітинах вільної води, що змінює гідратні оболонки білків цитоплазми і відбивається на функціонуванні білків-ферментів. При тривалому зів'яненні знижується активність ферментів синтезу і активуються гідролітичні процеси, зокрема протеоліз, що веде до збільшення вмісту в клітках низькомолекулярних білків. У результаті гідроліузу полісахаридів в тканинах нагромаджуються розчинні вуглеводи, стік яких з листя уповільнений. Під впливом засухи в листі знижується кількість ДНК внаслідок зменшення її синтезу і активації рибонуклеаз. У цитоплазмі спостерігається розпад полірибосомних комплексів. Зміни, що стосуються ДНК, відбуваються лише при тривалій засусі. Через зменшення вільної води зростає концентрація вакуолярного

соку. Змінюється іонний склад кліток, полегшуються процеси виходу з них іонів.

У більшості випадків сумарний фотосинтез при нестачі вологи знижується, хоч іноді на початкових етапах обезводнення спостерігається деяке збільшення його інтенсивності. Зниження швидкості фотосинтезу може бути слідством: 1) недостатку CO_2 через закриття подиху; 2) порушення синтезу хлорофілів; 3) роз'єднання транспорту електронів і фотофосфорування; 4) змін в фотохімічних реакціях і реакціях відновлення CO_2; 5) порушення структури хлоропластів; 6) затримка стоку ассимилятів з листя при тривалому водному дефіциті.

При обезводненні у рослин, не пристосованих до посухи, значно посилюється інтенсивність дихання (можливо, через велику кількість субстратів дихання – цукру), а потім поступово знижується. У посухостійких рослин в цих умовах істотних змін дихання не спостерігається або відмічається невелике посилення.

В умовах водного дефіциту швидко гальмуються клітинний розподіл і особливо розтягнення, що приводить до формування дрібних кліток. Внаслідок цього затримується ріст самої рослини, особливо листя і стебел. Ріст коріння на початку посухи навіть прискорюється і знижується лише при тривалій нестачі води в ґрунті. Коріння реагує на посуху захисними пристосування: опробковіння, суберинізацією екзодерми, прискоренням диференціровки клітин, що виходять з меристеми та ін.

Таким чином, нестача вологи викликає значні зміни більшості фізіологічних процесів у рослин, які поступово посилюються.

2.3.2 Методика визначення водного дефіциту рослин озимої пшениці

Відомо, що недостатня вологозабепеченість рослини завжди проявляється в обезводненості (зменшенні оводненості) її тканин. Ці зміни наступають насамперед в листях – місцях найбільш інтенсивного випаровування. Погіршення водного режиму рослини можна встановити шляхом періодичних визначень вмісту води в його листях. Як універсальна характеристика вологозабезпеченості пропонується використати водний дефіцит листя, який показує, скільки води (в процентах) бракує тканинам листя до повного їх насичення.

Згідно робіт В.С.Антоненко спостереження за водним дефіцитом листя рослин озимої пшениці d_l , з метою визначення середніх за день його значень $\overline{d}_l$, проводяться серіями з 5-6 визначень за день з 8 годин ранку (у разі відсутності роси) до заходу Сонця через кожні 2-3 години. При наявності вранці роси на рослинах, перше визначення d_l проводиться через 0,5 години після її зникнення. Спостереження за водним дефіцитом

проводяться в період весняно-літньої вегетації озимої пшениці, починаючи з настання фази вихід в трубку і до фази молочна стиглість.

Прилади і матеріали: торсійні терези (ВТ-500), ножиці, штатив з пробірками, фільтрувальний папір, дистильована вода, поліетиленові пакети, журнал для запису результатів спостережень.

Проведення та обробка спостережень

Спостереження та розрахунок водного дефіциту проводиться в наступній послідовності;

1. Взяття проб в термін спостережень.
2. Приготування та зважування висічок.
3. Насичення висічок.
4. Висушування та зважування висічок після їх насичення.
5. Розрахунок водного дефіциту.

Перед початком спостережень на полі вибирається характерна ділянка посіву (спостережлива ділянка), на рослинах якого проводиться визначення водного дефіциту їх листя. Для визначення $d_л$ в конкретний термін спостережень у 20 рослин (стебел) відрізається верхній, непошкоджений лист, що повністю сформувався (в період колосіння – молочна стиглість це флаговий лист). Проба з 20 листків відразу ж поміщається в поліетиленовий мішечок. Бажано, щоб проміжок часу між початком взяття проби і її зважування не перевищував 30 хвилин. У випадку, якщо спостережливі ділянки знаходяться на значній відстані від станції, то необхідно вжити заходів по збереженню проб від впливу прямих сонячних променів.

Відразу ж, після повернення з поля, приступають до зважування проб, заздалегідь зробивши висічки з листя таким чином: лист уявно ділиться на три рівні частини, а потім ножицями відсікаються дві крайні його частини – основа і кінчик, середня частина листка, що залишилася і являє собою висічку.

Отримані висічки зважують на торсійних терезах (окремо кожну або по декілька відразу). Загальна маса висічок заноситься в графу 3 табл. 2.4. Зважені "сухі" висічки поміщають в пробірку або хімічну склянку з вказівкою номера проби, терміну взяття і заливаються дистильованою водою.

Насичення проводиться протягом двох годин (±15 хв.) Після закінчення двогодинного терміну насичення поверхня висічок висушується фільтрувальним папером і висічка або група висічок зважується. Результати зважування заносяться в гр. 4, табл. 2.4. Процентне відношення різниці маси насиченої проби m_n (*г*р. 4, табл. 2.4) і сухої до насичення m_c (*г*р. 3) до маси насиченої представляє собою водний дефіцит листя d_l:

$$d_l = \frac{m_n - m_c}{m_n} \cdot 100 \qquad (2.24)$$

Значення d_l з точністю до 0,1% заносяться в гр. 5, табл. 2.4.

У таблицю заноситься також агрометеорологічна інформація за результатами спостережень на станції: температура повітря *T,* відносна вологість повітря е, вологозапаси в метровому шарі ґрунту $W_{0\text{-}100}$, атмосферні опади, кількість і вигляд хмар, стан диска Сонця, а також фаза розвитку і номер листка рослини, по якому визначається водний дефіцит.

Таблиця 2.4 – Спостереження за водним дефіцитом рослин озимої пшениці

Дата, фаза розвитку, № листка	Строк спостереження, год-хв	Маса	висічок, мг	d_l, %	T °C	e, %	$W_{0\text{-}100}$, мм	Стан освітленості, хмарність	Примітка
		m_c	m_n						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25.05	8-05	1796	1912	6,1	17,9	86	110	©[2], 0/0	
цвітін-	10-10	1794	1922	6,6	22,6	68		©[2], 0/0	
ня,	12-05	1876	2032	7,7	24,3	54		1/1, Cu	
флаг.	14-10	1811	1988	8,9	26,3	46		1/1, Cu	
лист	16-10	2171	2404	9,7	27,6	64		2/2, Cu	
	18-05	2100	2296	8,5	23,2	77		2/2, Cu	
			$\bar{d}_l$ =	7,9					

Середнє за день значення водного дефіциту рослин озимої пшениці $\bar{d}_l$ розраховується як середнє арифметичне із денної серії термінових визначень d_l.

Дані про водний дефіцит рослин озимої пшениці використовуються при оцінці умов вологозабезпеченності та прогнозуванні врожайності цієї кудьтури.

3 ФОТОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ҐРУНТОВО-РОСЛИННОГО ПОКРИВУ

3.1 Поняття про відбивні властивості природних утворень

Основними ознаками різних об'єктів згідно робіт К.Я.Кондратьєва, що можуть вивчатися дистанційно, є їх спектральні відбивні властивості, які досить повно можна виразити через спектральні коефіцієнти яскравості (СКЯ) і спектральні коефіцієнти відбиття (СКВ).

Згідно з визначенням, коефіцієнт яскравості r являє собою відношення яскравості досліджуваної поверхні I в даному напрямку до яскравості ідеального розсіювача I_o, що знаходиться в точно таких же умовах освітлення

$$r = \frac{I}{I_O}. \tag{3.1}$$

З визначення коефіцієнта яскравості слідує, що він залежить від напряму відбитого променя по відношенню до досліджуваної поверхні, яке визначається трьома кутами: кутом падіння Θ_i, кутом відбиття Θ_r і азимутом φ.

$$r = r_o\, f\,(\Theta_i\,, \Theta_r\,, \varphi), \tag{3.2}$$

де r – значення коефіцієнта яскравості, відповідне f =1.

Цю функцію зручно виразити графічно у вигляді так званої індикатриси відбиття (розсіювання), що являє собою сукупність коефіцієнтів яскравості, виміряних в різних напрямах при різних кутах падіння паралельного потоку випромінювання. Поверхня, для якої коефіцієнт яскравості не залежить від вказаних кутів, називається ортотропною (ламбертовою).

Коефіцієнт яскравості може бути виражений також як відношення яскравості I до освітленості E

$$r = I / E. \tag{3.3}$$

Якщо ж вимірюється весь променистий (світловий) потік розсіяний даною поверхнею у всіх напрямах L_r, і розраховується його відношення до променистого (світлового) потоку, що падає на цю поверхню L_i, то це відношення прийнято називати коефіцієнтом відбиття (альбедо)

$$A = L_r / L_i. \tag{3.4}$$

Радіаційні потоки L_i і L_r , що входять у формулу (3.4), можна

виразити через світність R_s,

$$dL_i = R_s\, ds, \tag{3.5}$$

де ds – елемент освітлюваної поверхні, або через освітленість

$$dLr = E\, ds. \tag{3.6}$$

Тоді коефіцієнт відбиття (альбедо) можна представити як відношення світності даної поверхні до її освітленості

$$A = R_s / E. \tag{3.7}$$

Порівнюючи формули (3.3) і (3.7), неважко бачити, що коефіцієнт відбиття є безрозмірною величиною (оскільки він являє собою відношення двох значень променистого потоку), тоді як числове значення коефіцієнта яскравості має розмірність, яка залежить від величин I і E

$$[r] = \frac{[I]}{[E]} = \frac{[L]}{[s][\Omega]} \cdot \frac{[s]}{[L]} = \frac{1}{[\Omega]}. \tag{3.8}$$

Звідси витікає, що коефіцієнт яскравості має розмірність, зворотну розмірності тілесного кута Ω.

Коефіцієнт яскравості і коефіцієнт відбиття сполучені наступною формулою:

$$A = \frac{L_r}{L_i} = r_0 \int_{\theta_r=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} f(\theta_i, \theta_r / \varphi) \cos\theta_r \sin\theta_r d\theta_r d\varphi. \tag{3.9}$$

Це співвідношення строго виконується тільки у випадку, коли поверхня освітлена паралельними пучками променів.

Оскільки відбивні властивості природних утворень значною мірою селективні, то на практиці звичайно використовуються спектральні коефіцієнти яскравості та спектральні коефіцієнти відбиття.

3.2 Відбивні властивості ґрунтово-рослинного покриву

3.2.1 Відбивні властивості ґрунтів

Відбивні властивості ґрунтів у видимій і ближній інфрачервоній області спектра згідно робіт В.І. Рачкулика, П.П. Федченко визначаються однотипними кривими, для яких характерний поступовий підйом із

збільшенням довжини хвилі.

Окремі ґрунти можуть значно розрізнятися між собою за коефіцієнтами відбиття або яскравості. На рис. 3.1 приведена залежність коефіцієнтів відбиття деяких ґрунтів від довжини хвилі. Рисунок дозволяє скласти уявлення про можливий діапазон зміни відбивних властивостей ґрунтів різних географічних зон. Ця залежність отримана за результатами фотометрування на спектрофотометрі СФ-10 повітряно-сухих зразків верхнього 5-ти сантиметрового шару ґрунту, просіяного через сито з розміром отворів 1 мм. Зразок такира фотометрувався без порушення поверхневої структури.

По спектральному складу відбитого світла найбільш істотно ґрунти розрізнюються в області спектра 400–600 нм. У області спектра 620–750 нм колірні відмінності між ґрунтами незначні і ґрунти за своїми відбивними властивостями наближаються до сірих тіл. Це добре видно на рис 3.2, де приведені відносні зміни коефіцієнтів відбиття деяких ґрунтів при зміні довжини хвилі на 1 нм. Показана на рис.3.2 характеристика мало міняється при зміні умов освітлення, зволоження та обробки ґрунту. Для сірих тіл вона дорівнює одиниці.

Спектральна відбивна здатність різних типів ґрунтів вивчалась в лабораторних умовах шляхом вимірювання спектрального альбедо. Вимірювання проводилися на спектрофотометрі СФ-10, що має межі спектральної чутливості від 400 до 750 нм. Досліджувалися ґрунти, взяті тільки з верхнього шару 10-ти сантиметрового гумусового горизонту. Для цього вони були висушені до повітряно-сухого стану і просіяні через два сита з діаметрами отворів 1 і 0,5 мм. Таке приготування зразка дозволило виключити вплив структури та вологості на спектральні відбивні характеристики вивчаємих ґрунтів. Спектральне альбедо основних типів ґрунтів, взятих в різних районах Східно-Європейської рівнини, приведене на рис. 3.3. Аналіз отриманих даних показує, що відмінності в спектральній відбивній здатності досліджуємих ґрунтів досить значні, що дозволяє користуватися ними як об'єктивними ознаками при вивченні ґрунтової морфології.

Так, наприклад, дерново-підзолисті ґрунти мають досить високу відбивну здатність, особливо в оранжево-червоній зоні спектра, тоді як сірі лісові ґрунти, що розвиваються під покривом широколистних лісів і більш багаті вмістом гумусу, мають більш низьку яскравість, особливо в короткохвильовій дільниці спектра.

Самі низькі відбивні властивості мають різні підтипи чорноземів. Ці ґрунти містять велику кількість темно-забарвлених речовин, зокрема гумусу (8–10 %), що зумовлює їх малу яскравість.

Для ґрунтів України дослідження спектральних відбивних властивостей ґрунтів проводилися як в лабораторних, так і в польових

умовах. Для лабораторних вимірювань зразки, взяті для різних типів ґрунтів, просушувалися до повітряно-сухого стану, потім подрібнювалися і просівалися через два сита з діаметрами отворів 0,5 і 1 мм. Вимірювання проводилися на спектрофотометрі СФ-10. Натурні дослідження виконувалися з повітря за допомогою унікального спектрометра, що дозволяє робити вимірювання в області спектра 400–900 нм.

Розглянемо деякі результати цих досліджень. У табл. 3.1 представлені результати статистичної обробки даних натурних вимірювань СКЯ ґрунтів. З цих даних видно, що не всі вибрані підтипи ґрунтів, розрізнюються за їх спектральними характеристиками. Практично не розрізнюються каштанові ґрунти та різні підтипи чорноземів і дерново-підзолистих ґрунтів. Мабуть, це пояснюється тим, що при натурних вимірюваннях не у всіх випадках вдається досить добре витримати постійні умови спостережень. У першому наближенні при створенні еталонного навчального масиву даних, при натурних вимірюваннях потрібно користуватися осередненими даними для трьох типів ґрунтів: чорноземів (включаючи каштанові), сірих лісових і дерново-підзолистих. Результати лабораторних досліджень спектральних відбивних характеристик взятих в ідентичних умовах проб цих же ґрунтів приведені в табл. 3.2.

Дані цієї таблиці показують, що довірчі інтервали у всіх підтипів ґрунтів скоротилися в декілька разів і поменшали до 0,1. Внаслідок цього, СКЯ всіх дев'яти підтипів подрібнених ґрунтів в повітряно-сухому стані статистично значуще розрізнюються практично на всіх довжинах хвиль. Однак натурні вимірювання СКЯ ґрунтів проводилися з літака на великих площах в природних умовах за допомогою польового спектрометра, а в лабораторних умовах вимірювали зразки ґрунтів площею 10 см^2 на спектрофотометрі СФ-10. Природно, що системи вимірювань були різними, внаслідок цього спостерігається зміщення лабораторних оцінок СКЯ одних і тих же ґрунтів відносно натурних. Порівняння значень СКЯ при натурних і лабораторних вимірюваннях показують, що останні в 1,5-3 рази більше.

Більшу частину всіх ґрунтів України займають різні підтипи чорноземів і каштанових ґрунтів, які знаходяться в Лісостеповій і Степовій зонах України. Великий вміст гумусу в орному горизонті забезпечує їм темне забарвлення. Криві спектрального відбиття цих ґрунтів мають монотонний хід з невеликим підйомом від фіолетової області спектра до червоної. Вони не мають характерного перегину в області спектра біля 600 нм, як це спостерігається у кривих СКЯ більш світлих ґрунтів (сірозем, жовтозем, червонозем та ін.).

Значні площі на Україні займають також світло-сірі і темно-сірі ґрунти. Вони менш багаті гумусом, ніж чорноземи, через це яскравість їх

вище, а крива спектрального відображення ґрунтів має невеликий перегин в області спектра біля 600 нм. Полісся України зайняте в основному дерново-підзолистими ґрунтами. Ці ґрунти бідні гумусом, процентний вміст його в орному шарі знаходиться в межах 1,5-2,5 %. У порівнянні з чорноземами і каштановими ґрунтами дерново-підзолисті ґрунти мають найбільшу спектральну відбивну здатність, особливо в довгохвильовій частині спектра.

3.2.2 Оптичні властивості листя рослин

Оптичні властивості листя рослин визначаються пігментною системою листка, товщиною, щільністю та анатомічною структурою листкової пластинки.

Поглинання променистої енергії в області фізіологічної радіації (350–750 нм) визначається головним чином хлорофілом і каратиноїдами. При цьому роль каратиноїдів в поглинанні відчутна лише в області 350-550 нм, в області довжин хвиль більше 550 нм практично все поглинання може бути віднесене за рахунок хлорофілу. Присутність хлорофілу зумовлює специфічність оптичних властивостей зеленого листка, завдяки чому його оптичні властивості відрізняються від оптичних властивостей інших природних об'єктів.

У області спектра 750-1200 нм пігменти практично нейтральні і оптичні властивості зеленого листка визначаються переважно тканиною листка. У цій області спектра зелений листок відрізняється високим відбиттям і малим поглинанням променистої енергії. В області спектра з λ>1200 нм поглинання променистої енергії зростає за рахунок поглинання водою, а відбиття знижується. Приблизно з довжини хвилі λ = 3000 нм лист поглинає практично неселективно до 96–98 % падаючої радіації.

Вміст хлорофілу у більшості видів рослин значно перевершує ту межу, яка забезпечує максимальне поглинання променистої енергії зеленим листком. Надмірність хлорофілу підтверджується, наприклад, тим фактом, що концентрація хлорофілу в кількості декількох процентів від звичайної може забезпечити 65–90 % нормального поглинання в області спектра 520–700 нм.

Загальний характер оптичних властивостей, дорослого листя рослин дозволяє ввести поняття «середнього» зеленого листка, якому приписуються оптичні властивості, що характеризують в середньому оптичні властивості дуже великої кількості видів рослин. Аналогічно можна говорити також про середній зелений лист якої-небудь певної групи видів рослин або про середній зелений лист окремого виду.

На рис. 3.4 приведені криві спектральних коефіцієнтів відбиття, пропускання і поглинання середнього зеленого листка

сільськогосподарських культур в області спектра 400–870 нм в період набору посівом максимальної рослинної маси. Ці дані характеризують в середньому оптичні властивості зеленого листя основних сільськогосподарських культур: пшениці, ячменю, вівса, кукурудзи, картоплі, бавовнику, цукрового буряка, соняшника, проса, гречки та конюшини. Криві отримані внаслідок осреднення даних фотометрування 30–100 зелених листків верхнього ярусу кожної культури. Із даних рис. 3.4 видно, що спектральні криві відбиття і пропускання подібні і мають хід, зворотний поглинанню. Однаковий хід спектральних кривих відбиття і пропускання пояснюється тим, що відбиття від листка відбувається не тільки від його поверхні, але і від внутрішніх шарів листка, внаслідок чого у відбитому потоці присутня складова, що пройшла через товщу листка.

Порівняння оптичних властивостей листя окремих культур з оптичними властивостями середнього листка сільськогосподарських культур показує, що в області ФАР (400–710 нм), культури за коефіцієнтами відбиття відрізняються від середнього листка більше, ніж за коефіцієнтами поглинання. У цій області спектра відмінності між середніми значеннями коефіцієнтів відбиття окремих культур і середнього листка доходять до 15 %, в той час як відмінності між коефіцієнтами поглинання не виходять за межі 6 %. У області спектра з довжиною хвилі λ >710 нм, навпаки, відмінності коефіцієнтів поглинання більш значні, ніж коефіцієнтів відбиття. Тут відмінності коефіцієнтів поглинання культур, що розглядаються і середнього листка досягають 17 %, а відмінності коефіцієнтів відбиття не перевищують 10 %.

Середні коефіцієнти відбиття листя багатьох дикорослих рослин мало відрізняються від коефіцієнтів відбиття листя сільськогосподарських культур у видимій і ближній інфрачервоній областях спектра. Деякі види пустельної рослинності мають підвищенні коефіцієнти відбиття.

3.3 Польові вимірювання відбивних властивостей ґрунтово-рослинного покриву

Польові вимірювання оптичних властивостей сільськогосподарських культур згідно з роботами В.І. Рачкулика, М.В.Ситнікової, О.Д.Клещенко включають наземні, автомаршрутні та авіамаршрутні вимірювання.

Визначення коефіцієнтів яскравості об'єктів в польових умовах проводиться відносним методом порівняння їх яскравості з яскравістю еталона. При цьому коефіцієнт яскравості об'єкта визначається по формулі

$$R_{об} = \frac{N_{об}}{N_{ет}} R_{ет}, \qquad (3.10)$$

де $N_{об}$ *і* $N_{ет}$ – відліки реєструючого приладу при вимірюванні яскравості об'єкта і еталона відповідно;

$R_{ет}$ – коефіцієнт яскравості еталона.

3.3.1. Характеристика фотометрів та етаонів

При проведенні фотометричних вимірювань використовуються прилади промислового виробництва та спеціально розроблені і виготовлені в Середньоазіатському регіональному науково-дослідному інституті (САРНДІ), Інституті експериментальної метеорології (ІЕМ) і Всеросійському науково-дослідному інституті сільськогосподарської метеорології (ВНДІСГМ). Крім того, використовується польовий спектрофотометр, розроблений в лабораторії аерометодів Міністерства геології СРСР. До складу приладів входять: фотометри, еталони, допоміжні пристрої для кріплення приладів, автоматичні реєструючі потенціометри типу КСП-4, літакові 12-ти канальні осцилографи К 12-21 і К 12-22, мікроамперметри типу М-194, М-198, М-109, контрольний освітлювач, набір нейтральних каліброваних ослаблювачів.

Апаратура, що застосовується забезпечує проведення авіаційних, автомаршрутних і наземних вимірювань, а також контроль приладів в процесі вимірювань. При наземних, автомаршрутних і авіаційних вимірюваннях використовуються одноканальні, двохканальні та шестиканальні лінзові фотометри, а також трубчастий фотометр із змінним кутом зору. Приймачем променистої енергії в лінзових фотометрах служить фотодіод ФД-24К, який працює в фотогальваничному режимі, а в трубчастому фотометрі, крім кремнієвого фотодіода, використовується селеновий фотоелемент. Реєстрація відбитих потоків при наземних вимірюваннях здійснюється за допомогою мікроамперметрів М-194, М-198 і М-109, а при автомаршрутних та авіаційних – за допомогою електронних автоматичних потенціометрів КСП-4 або літакових 12-ти канальних осцилографів К 12-21 і К 12-22. Зміна спектральної чутливості одно- і двохканального фотометрів досягається використанням різних інтерференційних світлофільтрів. Кут зору лінзових фотометрів змінюється від 3 до 35°, шляхом зміни об'єктивів.

Двохканальний фотометр складається з фотометричної головки і механізму дистанційного управління, закріпленого на несучій трубі. Контроль за горизонтальністю еталона під час роботи здійснюється за допомогою рівня. Оптична схема фотометра приведена на рис. 3.5. Для еталонного розсіювача *1* використовується матоване скло МС-14 на пропускання. У разі положення поворотної призми *2,* зображеного суцільними лініями, світловий потік від еталона *1,* проходячи через

поворотну призму *2* і конденсорну лінзу *6,* ділиться світлоділильним кубиком *5*. Потім він через інтерференційні світлофільтри *4* попадає на фотоелементи *3, 3'*. В результаті цього відбувається вимірювання яскравості еталона в двох ділянках спектра. Якщо поворотна призма *2* звернена до об'єктиву *7* (штрихове зображення положення призми), то проводиться вимірювання яскравості об'єкта. Поворот призми *2* здійснюється за допомогою механізму дистанційного управління, що складається з двигуна, редуктора і спеціального (мальтійського) механізму. Цей механізм має чотири фіксованих положення, кожному з яких відповідає певне положення призми. Це дозволяє в процесі роботи послідовно робити вимірювання яскравості еталона, об'єкта і вимірювати величину сигналу при закритому працюючому фотометрі («нуль» фотометра). Управління механізмом проводиться з пульта управління.

Врахування нуля фотометра дуже важливе, оскільки в польових умовах він може складати відчутну величину. Треба зазначити, що вказаний нуль фотометра не завжди тотожний темновому струму фотоелемента, оскільки крім темнового струму він може визначатися і за інших причин – наведеннями, засвіченнями та ін.

Шестиканальний фотометр (рис.3.6,а) складається з фотоелектричної вимірювальної головки *8* і об'єктиву *9*. Об'єктив фотометра виконаний у вигляді циліндричного тубуса *12,* з вбудованою в нього лінзою *10* і діафрагмою *11*. Головка *8* виконана у вигляді порожнистого циліндра *2,* всередині якого розміщені світлофільтри *4* і фоточутливий елемент *5*. У фотометрі використовуються інтерференційні світлофільтри. Вони охоплюють спектральний діапазон 450–800 нм з пропусканням в максимумі 30–45 % при півширині пропускання 10–15 нм.

Світлофільтри розміщені в касеті *3* турникетного типу, розташованої між вхідним вікном *1* вимірювальної головки і фотоелементом *5*. В касеті є сім гнізд, в які вставлено шість світлофільтрів і одна металева заглушка. Заглушка дозволяє періодично фіксувати нуль фотометра. Вісь *7* касети *3* виведена назовні через кришку корпусу *6*. В фотометрі передбачається ручна і автоматична зміна світлофільтрів. Ручна зміна світлофільтрів проводиться за допомогою рукоятки, що кріпиться до осі *7*. Для автоматичної зміни світлофільтрів використовувався автоматичний пристрій, що складається з мікроелектродвигуна приводу типу ДПМ-25, редуктора та вузла повороту на фіксований кут, основною частиною якого є мальтійський хрест. Автоматичний пристрій, зібраний в металевому корпусі, кріпиться до кришки вимірювальної головки.

При безперервній роботі мікроелектродвигуна приводу касета через рівні проміжки часу повертається на певний кут, розташовуючи перед фотоелементом почергово всі вставлені в неї світлофільтри і заглушку. Час зміни сусідніх світлофільтрів становить 1 сек, час витримки світлофільтра

перед фотоелементом – 1 сек. Таким чином, запис результатів вимірювань на діаграмній стрічці автоматичного потенціометра або на фотопапір літакового осцилографа складається з циклів, відділених один від одного записом нуля фотометра.

У комплект шестиканального фотометра входить бортовий еталон (див. рис. 3.6, б), який використовується при літакових вимірюваннях. Бортовий еталон являє собою порожнистий циліндр *2*, у верхній частині якого закріплений розсіювач *1* з матованого скла МС-14. У нижній частині циліндра *2* передбачене посадочне місце *5* для кріплення фотометра. Встановлення горизонтального положення молочного розсіювача *1* забезпечується трьома встановлювальними гвинтами *4*, розташованими під кутом 120° один до одного і жорстко сполученими з опорним кільцем *3*, за допомогою якого вся конструкція кріпиться до обшивки літака. Контроль горизонтального положення здійснюється за допомогою рівня *6*.

Стабільність показів і лінійність режиму роботи контролюється освітлювачем (див. рис. 3.6, в). Освітлювач виготовлений у вигляді суцільної конструкції, закріпленої на масивному штативі, з одного боку якого розташоване джерело світла *1*, з іншого – з'єднувальний фланець *5*. Між конденсором *2* і матованим склом *4* є карман, в який при необхідності вміщуються калібровані ослаблювачі *3*. З'єднувальний фланець *5* сконструйований таким чином, що фотометр приєднується до нього своїм об'єктивом за допомогою байонетного з'єднання. Живлення освітлювача здійснюється від стабілізованого джерела постійного струму, в якому використовується джерело живлення фотометра ФМ-58.

Для наземних вимірювань коефіцієнтів яскравості також використовується візуальний фотометр "Жайворонок". Оптична схема фотометра представлена на рис. 3.7. Світло від об'єкта *11* через об'єктив *10* попадає в фотометричну кулю *1*. Порівняння потоків, що йдуть від кулі і від еталона *2,* проводиться за допомогою кубика Люмера-Бродхуна *9*. Вирівнювання яскравості полів порівняння здійснюється поворотом поляроїда *3,* пов'язаного з вимірювальним барабаном *8*. Спостереження ведеться через світлофільтр *5*, що вирізає область спектра 600–690 нм. Контроль установки еталона в горизонтальній площині проводиться за допомогою маятникового рівня *7*. На трубці *6* закріплений непрозорий екран *4,* що захищає око спостерігача від прямих сонячних променів. На барабан нанесена шкала, що дозволяє відлічувати коефіцієнти яскравості, а також величину зеленої маси.

При використанні *еталонів* виникає питання про міру селективності та ізотропності їх відбиття. У цьому відношенні найбільш відповідними еталонами є такі еталони, як окисел магнію, гіпсові пластинки і баритований папір. Однак, ці еталони не завжди зручно використовувати на практиці, тому в польових умовах використовуються нарівні з

баритованим папером пустельний еоловий пісок, пісковиті екрани, а також матоване скло на пропускання.

Якщо за умовою спостережень, яскравість еталона вимірюється в якому-небудь фіксованому напрямку, то немає необхідності враховувати яскравість еталона у всіляких напрямках, а досить обмежитися врахуванням поведінки його яскравості тільки в даному напрямку.

У зв'язку з тим, що польові вимірювання проводяться протягом дня, то важливо знати, як змінюються відбивні властивості еталонів при зміні висоти Сонця. Оскільки коефіцієнти яскравості ґрунтово-рослинних об'єктів визначаються шляхом порівняння їх яскравості з яскравістю еталона, виміряною в напрямку нормалі, то досліджується залежність коефіцієнта яскравості еталонів у вказаному напрямку від висоти Сонця. Дослідження залежності відбивних властивостей еталонів від кута падіння світла проводиться на платформі розміром 1×1м, яка може повертатися навколо горизонтальної і вертикальної осі. Це дозволяє легко орієнтувати її поверхню під певним кутом до сонячних променів. Вимірювання проводяться при допомозі фотометра, який кріпиться на кронштейні на висоті 70 см над поверхнею еталона так, щоб його оптична вісь була перпендикулярна поверхні платформи. Для виключення впливу розсіяного світла неба і земної поверхні вимірювання проводяться послідовно при затіненій і незатіненій поверхні еталона, тобто використовується метод «Сонце–тінь», який застосовується при перевірці актинометричних приладів. Поверхня еталона затіняється за допомогою непрозорого екрана діаметром 80 см, який встановлюється на відстані 4-5 м від платформи. Вимірювання проводяться при висотах Сонця 40-45° при безхмарному небі. Один цикл вимірювань яскравості еталона в межах кута падіння світла від 18 до 80° проводиться протягом 5-7 хв. Протягом цього часу прихід сонячної енергії залишається практично постійним, що підтверджується результатами повторних вимірювань яскравості еталона при поверненні платформи в початкове положення.

У табл. 3.3 приведені відносні зміни коефіцієнтів яскравості зразків еталонів, що застосовуються в напрямку нормалі при зміні кута падіння світла для фотометра з кутом зору 35°.

Таблиця 3.3 – Відносні зміни коефіцієнтів яскравості зразків-еталонів в напрямку нормалі при зміні кута падіння світла для фотометра з точкою зору 35°.

Кут падіння світла, град.	Баритоновий папір	Пісок	Піщаний екран	Кут падіння світла, град.	Баритоновий папір	Пісок	Піщаний екран
20	1,00	1,0	1,0	50	0,97	0,97	0,97
30	1,00	1,0	1,0	60	0,93	0,95	0,94
40	0,99	0,99	0,99	70	0,89	0,92	0,91
50	0,98	0,98	0,98	80	0,84		0,88

Проведені дослідження показали, що залежність коефіцієнтів яскравості дрібнозернистого, пустельного піску еольного походження і піщаних поверхонь може бути приблизно таким же, як і для баритованого паперу. Крім того, відбивні властивості еолового піску залишаються незмінними при тривалому його виикористанні в польових умовах, а також при транспортуванні та зберіганні. Завдяки цим якостям пустинний еоловий пісок є дуже зручним еталоном при польових вимірюваннях. До недоліків піску треба віднести помітну селективність його відбивних властивостей, яка зумовлює деякі зміни коефіцієнтів яскравості піску із зміною спектрального складу падаючого світла. Проте, при використанні вузькосмугових фільтрів вплив цього чинника значно послабляється.

При вивченні залежності коефіцієнта яскравості еталона з матованого скла, також як і для інших еталонів використовується метод «Сонце–тінь». Для цього фотометр, в якому як еталон використовується матоване скло, закріплюється на теодоліті, еталоном вгору і проводиться серія вимірювань фотометром при різних кутах нахилу теодоліта при затемненому і незатемненому еталоні.

Залежність відносної зміни коефіцієнтів яскравості одного матованого скла МС-14 від кута падіння світла для шестиканального фотометра з точкою зору 6° приведена на рис. 3.8. Коефіцієнти яскравості еталонів визначалися відносно баритованого паперу в польових умовах.

Визначення коефіцієнта яскравості баритованого паперу досить складне. Фотометр ФМ-58 дозволяє надійно визначати коефіцієнти яскравості в діапазоні довжин хвиль 400–620 нм при куті падіння світла 45°, маючи кут з точкою зору біля 2°. Область спектральної чутливості фотометрів лежить в межах 380-900 нм, а кути точки зору змінюються від 3 до 35°.

Приймається, що коефіцієнт яскравості баритованого паперу в діапазоні 380–900 нм, так само як в діапазоні 400–620 нм, не залежить від довжини хвилі, і що її коефіцієнт яскравості не залежить від кута точки зору фотометра в межах від 2 до 35°.

Оскільки коефіцієнти яскравості еталона можуть залежати від кута точки зору фотометра, то залежність коефіцієнтів яскравості еталона від кута падіння світла будується для кожної пари фотометр–еталон. Отримані зв'язки використовуються при визначенні коефіцієнтів яскравості природних об'єктів.

3.3.2 Проведення наземних та авіаційних вимірювань

Під час *наземних вимірювань* фотометр кріпиться до переносної фотометричної стойки. Переносна фотометрична стойка складається з

вертикальної і горизонтальної штанг, скріплених між собою під прямим кутом. Довжина горизонтальної штанги 2 м, довжина вертикальної штанги може змінюватися від 2 до 4 м. Фотометр кріпиться на кінці горизонтальної штанги.

При використанні одно- і шестиканальних фотометрів застосовується еталон розміром 1×1 м, який кріпиться до штанги відповідної довжини, і під час вимірювань періодично підноситься під фотометр. Горизонтальність еталона контролюється за допомогою схилу або рівня, встановленого на штанзі. У тому випадку, коли висота рослинного покриву, що досліджується, не перевищує 1 м, вимірювання проводяться з рук. Польовий еталон в цьому випадку встановлюється на тринозі на рівні рослинності.

Для вивчення залежності коефіцієнта яскравості природних об'єктів від точки зору фотометра використовується фотометр із змінним кутом точки зору. Для вимірювань підбираються майданчики з рівномірно розподіленими по площі структурними елементами. Фотометр встановлюється на висоті 2 м так, щоб його оптична вісь була перпендикулярна поверхні ґрунту. При такій висоті установки діаметр фотометруємого майданчика при мінімальному куті зору фотометра становить 60 см, що забезпечує попадання в поле зору фотометра досить великої кількості структурних елементів поверхні. Починаючи з деяких кутів зору фотометра, в поле зору фотометра попадає тінь від приладу і штанги, на якій він кріпиться. Однак контрольні вимірювання показують, що до висот Сонця 60° тінь від приладу не впливає помітним чином на результати вимірювання.

Під час вимірювань приймач світлової енергії фіксується всередині циліндра на певних відстанях від вхідної діафрагми. Ці відстані підбираються таким чином, щоб попередній кут точки зору фотометра відрізнявся від подальшого не більш ніж на 10°.

Це дозволяє фотометруєму поверхню розбити на кільцеві зони, укладені між двома сусідніми кутами точки зору, і у відліки, отримані для кожної зони, ввести поправки на кут падіння світла (табл. 3.4). Поправка вводиться шляхом розподілу відліку для кожної кільцевої зони на чутливість, отриману для кута падіння, відповідного середині кільцевої зони. Оскільки збільшення кута точки зору фотометра при переміщенні приймача з одного робочого положення в інше не перевищує 10°, то при цьому кут падіння світла для кожної наступної кільцевої зони збільшується не більше, ніж на 5°.

Після введення поправок на кут падіння світла виправлені відліки, отримані для кожної кільцевої зони, підсумовуються. В результаті одержуємо відліки, виправлені на кут падіння світла для кожного кута точки зору фотометра.

Для отримання коефіцієнтів яскравості поверхні, що досліджується при даному куті зору фотометра, необхідно відлік, виправлений на кут падіння світла, розділити на відлік, який виходив би при фотометруванні в тому ж куті зору ідеально білої поверхні, що знаходиться при однакових умовах освітлення з реальною поверхнею. При цьому передбачуваний відлік для ідеально білої поверхні також повинен бути приведений до чутливості приймача при нормальному падінні світла.

Таблиця 3.4 – Залежність чутливості приймачів світлової енергії для областей спектра з довжиною хвилі $\lambda_{эфф}$=660 і 800 нм від кута падіння сонячних променів

Кут падіння, град.	Відносні зміни коефіцієнта яскравості	Кут падіння, град.	Відносні зміни коефіцієнта яскравості
85	0,63	45	0,95
80	0,72	40	0,96
75	0,79	35	0,97
70	0,83	30	0,98
65	0,86	20	0,99
60	0,89	10	1,00
55	0,91	0	1,00
50	0,93		

Показання мікроамперметра $N(\alpha)$, приведене до умови нормального падіння світла на приймач, при фотометруванні реальної поверхні, обмеженій кутом зору 2α, рівне:

$$N(\alpha) = 2\pi\ K\int_0^{\alpha} B(z)\sin z\ \cos z\ dz, \qquad (3.11)$$

де $B(z)$ – середня яскравість кільцевої зони, що визначається кутами z і $z+dz$;

K – коефіцієнт пропорціональності.

Якби проводилося фотометрування ідеально білої поверхні, обмеженої тією ж точкою зору 2α, то відлік мікроамперметра $N'(\alpha)$, приведений до умови нормального падіння світла на приймач, був би рівний

$$N'(\alpha) = 2\pi\ KB\int_0^{\alpha} \sin z\ \cos z\ dz = \pi KB\sin^2\alpha = A\ \sin^2\alpha, \qquad (3.12)$$

де B – яскравість ідеально білої поверхні; $A=\pi KB$.

Оскільки A не залежить від кута точки зору фотометра, то для

отримання відносних коефіцієнтів яскравості реальних поверхонь при різних кутах точки зору фотометра показання мікроамперметра $N(\alpha)$ ділиться на відповідні ним значення $sin^2\alpha$.

Отримання индикатрис відображення ґрунтово-рослинних об'єктів пов'язане з відомими труднощами. Кут зору фотометра повинен бути досить малим і разом з тим в поле зору фотометра повинна попасти велика кількість структурних елементів фотометруємого об'єкта. Внаслідок неоднорідності ґрунтово-рослинних об'єктів бажано, щоб в полі зору фотометра при різних кутах візування попадала одна і та ж ділянка об'єкта. Щоб задовольнити в якійсь мірі цим вимогам, для фотометрування підбираються однорідні майданчики, а фотометр в процесі вимірювання переміщається по дузі кола, центр якої співпадає з центром фотометруємого майданчика. У роботі використовується одноканальний фотометр з кутом точки зору 7° і діаметром об'єктива 20 см. При висоті установки фотометра 2 м і вимірюваннях в прямовисному напрямку діаметр фотометруємого майданчика становить 44 см.

У процесі вимірювань фотометруємі майданчики трансформувалися в еліпси, мала вісь яких залишається рівної 44 см, а велика збільшується із збільшенням кута візування. Для кута візування 30° велика вісь становить 51 см, а при куті візування 45° – 63 см. Вимірювання коефіцієнтів яскравості проводяться в азимутах 0° (з боку Сонця), 180° (з боку, протилежної Сонцю), 90° (в площині, перпендикулярній вертикалі Сонця), 45 і 225°, при кутах візування 0–70°. Кути візування відлічуються від вертикалі. Коефіцієнти яскравості об'єктів для різних кутів візування розраховуються відносно яскравості еталона, виміряної в напрямі нормалі.

Крім фотометричних вимірювань в програму наземних спостережень входять вимірювання надземної рослинної маси в сирій і сухій вазі, площі листової поверхні, висоти рослин і густини стояння рослин в посіві.

Проведення автомаршрутних вимірювань. Для вимірювання спектральних яркісних характеристик ґрунтів і природного рослинного покриву на великих територіях створений пересувний фотометричний комплекс, основою для якого послужила метеорологічна станція (ПМС) на базі автомашин ЗІЛ-157, яка була відповідним образом переобладнана. Для роботи використовуються шести- і двухканальні фотометри з дистанційним управлінням. Кут зору фотометрів лежить в межах від 3 до 35°. Фотометри розміщуються попереду автомашини на штанзі. Штанга забезпечує винесення фотометрів перед автомашиною приблизно на 2 м. Висота підвіски фотометрів над підстильною поверхнею становила 2,5 м. Така висота установки фотометрів в залежності від їх кута точки зору дозволяє проводити фотометрування смуги місцевості шириною від 0,13 до 1,6 м.

Реєстрація сигналів проводиться за допомогою 12-ти канального літакового осцилографа К12-22 з оптичним записом на фотопапір. Електроживлення вимірювальної і реєструючої апаратури здійснюється від батареї акумуляторів 22 НКН-45. Реєстратор, пульт управління і акумуляторна батарея встановлюються в фургоні ПМС.

Фотометрування проводиться як при стоянці машини, так і при її руханні. У останньому випадку швидкість руху машини знаходиться в межах 5-10 км/год. При руханні є можливість провести безперервне фотометрування сінокосів, пасовищ, ріллі і узбіч полів з посівами сільськогосподарських культур. Вимірювання яскравості еталона шестиканального фотометра проводиться на початку і кінці маршруту фотометрування, а яскравість еталона двухканального фотометра вимірюється періодично під час руху машини. Результати вимірювань яскравості еталона двухканального фотометра використовуються для врахування зміни приходу сонячної радіації під час руху по маршруту.

Проведення авіаційних вимірювань. У програму авіаційних вимірювань входить визначення спектральних коефіцієнтів яскравості сінокосів, пасовищ і сільськогосподарських полів, а також вивчення оптичних властивостей атмосфери. Вимірювання проводяться з літака Іл-14.

Визначення коефіцієнтів яскравості сінокосів, пасовищ і сільськогосподарських полів проводиться двома двухканальними фотометрами з дистанційним управлінням, які установлюються у вікнах літака. Використання двох двухканальних фотометрів дозволяє виконувати одночасні вимірювання яскравості в чотирьох ділянках спектра.

Вивчення оптичних властивостей атмосфери проводиться за допомогою зондування, яке полягає в безперервному зниженні літака з постійною швидкістю з висоти 5100 до 100м. Схема зондування приведена на рис. 3.9. Такий тип зондування дозволяє за 12-17 хв. зробити розріз 5-ти кілометрового шару атмосфери.

Зондування проводиться над Азовським морем, оскільки підстиляюча поверхня в цьому випадку повинна мати однакові відбивні властивості під всією трасою зондування. Однорідність відбивних властивостей водних поверхонь перевіряється вимірюваннями коефіцієнтів яскравості з висоти 200-300 м. Зондування проводиться при ясній безхмарній погоді.

У роботі використовуються три шестиканальних фотометра, два з яких мають кут зору 6°, один – 10°, літаковий еталон, контрольний освітлювач, гоніометрична платформа. Реєстрація сигналів здійснюється автоматичним потенціометром КСП-4 або 12-ти канальним літаковим осцилографом К12-22 (Д 12-21). Фотометри з кутом точки зору 6°

використовуються для вимірювання яскравості підстилаючої поверхні та еталона, а фотометр з кутом зору 10° використовується як актинометр.

У всіх трьох фотометрах використовуються однакові інтерференційні світлофільтри. Схема розташування приладів на борту літака представлена на рис. 3.10.

Методика авіаційних вимірювань при зондуванні полягає в наступному. Вибирається однорідна за відбивними властивостями ділянка водної поверхні протяжністю не менше 20 км. Після набору заданої висоти чутливість, що використовується в роботі фотометрів перевіряється на контрольному освітлювачі *4*. Потім один з фотометрів з кутом зору 6° встановлюється на гоніометричну платформу 5, розташовану в фотолюці літака, а другий такий же фотометр з'єднується з еталоном *2*. Третій фотометр з кутом зору 10° виставляється у відкрите вікно літака для вимірювання прямої сонячної радіації. Після цього виконується зондування. Під час спуску літака горизонтальність еталона і гоніометричної платформи підтримується за допомогою встановлювальних гвинтів. При виконанні зондування проводиться безперервна реєстрація прямої сонячної радіації і яскравості системи "атмосфера – водна поверхня" в шести ділянках спектра з висоти 5100 до 100 м.

По закінченні зондування чутливість всіх трьох фотометрів знову перевіряється на контрольному освітлювачі. При контролі чутливості фотометрів напруження на лампі осветлювача підтримується постійним і контролюється цифровим електронним вольтамперметром ВК 2-20.

3.3.3. Розмір фотометруємого майданчика і контроль чутливості фотометрів

Фотометруємий майданчик нерухомих лінзових і трубчастих фотометрів являє собою коло, діаметр якого визначається виразом

$$d = 2H\ tg\frac{\alpha}{2}, \tag{3.13}$$

а площа

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \pi H^2 tg^2\frac{\alpha}{2}, \tag{3.14}$$

де H – висота установлення фотометра над поверхнею Землі;

α – кут зору фотометра.

Таким чином, розмір фотометруємого майданчика для нерухомого

фотометра залежить тільки від кута зору і висоти установлення фотометра. Якщо вимірювання проводяться фотометром, що переміщається, то розмір фотометруємого майданчика буде залежати від швидкості переміщення фотометра і часу реєстрації сигналу (інерції приладу). При переміщенні фотометра ширина фотометруємого майданчика визначається виразом (3.13), а його довжина *I* дорівнює

$$l = 2H\ tg\tfrac{\pi}{2} + v\Delta t, \qquad (3.15)$$

де v – швидкість переміщення фотометра;

Δt – час реєстрації сигналу.

Площа фотометруємого майданчика S_v в цьому випадку дорівнює сумі площ двох фігур – кола діаметром d і прямокутника з сторонами d і $v\Delta t$:

$$S_v = \frac{\pi d^2}{4} + dv\Delta t. \qquad (3.16)$$

Легко бачити, що друга складова правої частини рівняння (3.15) не залежить ні від кута зору фотометра, ні від висоти його встановлення над поверхнею Землі. Тому одним тільки зменшенням кута зору фотометра не завжди можна добитися бажаного розв'язання на місцевості. Наприклад, поле зору фотометра з кутом зору 0,5°, що знаходиться на висоті 100 м, представляє собою коло діаметром біля 0,9 м. При переміщенні указаного фотометра із швидкістю 220 км/год. і часу реєстрації сигналу, рівному 0,1 сек, розв'язання на місцевості в напрямку, перпендикулярному переміщенню, становитиме приблизно 0,9 м, а в напрямку переміщення – 7 м, тобто величина $v\Delta t$ в цьому випадку, буде біля 6 м.

Інерція реєстраторів, що використовуються змінюється від 0,03 (літаковий осцилограф) до 0,2 сек (автоматичний потенціометр КСП-4). Відповідно до цього величина $v\Delta t$ при авіаційних вимірюваннях становить 2-12 м, а при автомаршрутних – 0,04-0,08 м. Ці величини враховуються при розрахунку розмірів фотометруємых майданчиків.

Контроль чутливості фотометрів. У процесі вимірювань чутливість фотометрів під дією різних чинників може помітно змінюватися. Так, вакуумні і кремнієві фотоелементи через 10-15 хв після їх включення можуть зменшити свою чутливість на 5-10 % (ефект «втоми»), а чутливість фотоопорів і сірчистосрібних фотоелементів в значній мірі залежить від температури.

При визначенні коефіцієнтів яскравості об'єктів одним фотометром, коли яскравість еталона вимірюється безпосередньо до і після вимірювання яскравості об'єкта, необхідність контролю чутливості фотометра відпадає. Але в тих випадках, коли фотометр використовується

для вивчення приходячого світлового потоку або яскравості об'єктів, а також при визначенні коефіцієнтів яскравості об'єктів двома фотометрами, одним з яких вимірюють яскравість еталона, а іншим – яскравість об'єкта, необхідно проводити контроль чутливості фотометрів. Природно, що контроль чутливості фотометрів ні в якій мірі не виключає використання еталонів при визначенні коефіцієнтів яскравості об'єктів.

Для контролю чутливості фотометрів часто використовують лампи розжарювання, які працюють в постійному режимі живлення. Режим живлення таких ламп необхідно підтримувати з високою точністю, оскільки зміна номінального напруження на 1 % може спричиняти зміну світлового потоку на 3,5 %, а відхилення сили струму на 1 % від номінальної, приводить до зміни світлового потоку на 6-7 %. Отже, контроль живлення ламп, що використовуються в світлових вимірюваннях, вигідніше здійснювати по напруженню, а не по силі струму.

Світлова віддача лампи розжарювання росте з підвищенням температури її спіралі. Але із зростанням температури дуже швидко росте випаровування вольфраму з поверхні нитки напруження і відповідно падає термін служби лампи. Вольфрам, що випаровується, осідає на колбі, зменшує світлову віддачу лампи. Тому лампи, що застосовуються для контролю чутливості фотометрів, бажано використовувати в режимі недожару. Навіть невелике зменшення робочого напруження спричиняє помітне збільшення терміну служби лампи. Наприклад, при зменшенні номінального напруження на 10 % термін служби лампи розжарювання збільшується більш ніж на 300 %.

Для контролю використовують лампу розжарювання Р-64 з номінальним напруженням 6 В. Зміна спектральних променистих потоків лампи Р-64 при зміні робочого напруження на 1 % для різних робочих напружень показана в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Зміна спектральних потоків лампи розжарювання Р-64 при зміні робочого напруження на 1 % для різних робочих напружень

Робоче напруження, %	Довжина хвилі λ, нм					
	450	502	554	601	682	784
100 (номінальне)	4,0	3,6	3,5	2,9	2,8	2,5
90	4,1	3,8	3,6	3,0	3,0	2,6
80	4,3	4,0	3,8	3,3	3,2	2,7
70	4,5	4,2	4,0	3,5	3,3	2,9
60	4,9	4,5	4,2	3,8	3,6	3,3
50	5,2	4,9	4,5	4,0	4,1	3,5

При роботі на лампу подається напруження, що становить 90 % від

номінального. Контроль режиму живлення лампи проводиться по напруженню за допомогою цифрового електронного вольтамперметра ВК2-20, який дозволяє вимірювати напруження з точністю до 0,2 %, що дає можливість контролювати зміну світлового потоку в будь-якому спектральному інтервалі з погрішністю не вище 1 %.

4 МЕТОДИ ВИВЧЕННЯ ВОДНОГО РЕЖИМУ ТА ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНОСТІ ПОСІВІВ

4.1 Методи вимірювання вологості ґрунту в окремій точці

Всі методи вимірювання вологості ґрунту можна розділити на: точкові (вимірювання в окремій точці), площинні та розрахункові. Під *точковими* маються на увазі методи, за допомогою яких можна визначити значення вологості ґрунту в окремих точках конкретного поля. *Площинними* вважаються методи, за допомогою яких проводяться вимірювання вологості на великих площах з літаків або вертольотів. До *розрахункових* методів визначення вологості ґрунту відносяться математичні моделі різної складності, в яких використовується різноманітна початкова інформація: ґрунтова, біологічна, метеорологічна.

4.1.1 Прямі методи визначення вологості ґрунту

Серед різноманітних методів визначення вологості ґрунтів найбільш поширеним, досить надійним, хоч і самим трудомістким є термостатно-ваговий. Власне, до його назви слід би додавати слово «буровий», оскільки при визначенні вологості зразки ґрунту заздалегідь беруть за допомогою бура якої-небудь конструкції. Термостатно-ваговий метод широко застосовується при проведенні лабораторних робіт, а також в польових умовах передусім через простоту і доступність обладнання, що використовується. До нього відноситься – бур (в польових умовах), сушильні бюкси, терези (технічні або електричні) з максимальною погрішністю вимірювання 0,1 г, термостат або сушильна шафа.

Термостатно-ваговий метод відноситься до прямих методів визначення вологості. Після висушування зразка ґрунту в термостаті при температурі 105°С визначається його абсолютна вологість в грамах, а потім розраховується відносна вологість, або просто вологість ґрунту в процентах.

Основним джерелом помилки для термостатно-вагового методу служить згідно робіт В.Ф. Гридасова погрішність зважування. Згідно прийнятої в системі Держкомгідромету України, погрішності зважування на технічних або електричних терезах, з ціною поділки шкали 0,1 г, загальна погрішність зважування пустої сушильної бюкси, вологого ґрунту в бюксі та висушеного ґрунту становитиме приблизно 0,17 г. При масі абсолютно сухого ґрунту в бюксі 25-40 г абсолютна погрішність визначення вологості у відносних одиницях вологості складе біля 0,5 %. При вологості ґрунту, яка звичайно становить 10-20 %, погрішність визначення вологості у відносних одиницях буде рівна приблизно 3 %. Для торф'яних шарів болотяних ґрунтів при середній масі абсолютно сухого ґрунту в бюксі біля 3,5 г погрішність визначення в одиницях вологості становитиме приблизно 0,5 %, а у відносних

одиницях при вологості торфу 150 %, – біля 3%.

Необхідно підкреслити, що при сучасному стані розвитку методів вимірювання вологості ґрунту ще немає методу, який би дозволяв провести визначення вологості з абсолютною (в одиницях вимірювання вологості) погрішністю 0,5 % і відносною погрішністю 3 %.

Для виключення впливу погрішності визначення вологості ґрунту в окремій точці на розрахунки вологозапасів на окремому полі, необхідно зважування зразків ґрунту провести з погрішністю 0,05 г, тобто на терезах більшого класу точності. Тоді абсолютна погрішність визначення вологості становитиме приблизно 0,25 %, а відносна – біля 1,5 %, що дозволить практично виключити їх з розрахунку погрішності визначень вологозапасів на полі. Можна розрахувати, що погрішність, яка дорівнює 0,1 г, при повторному зважуванні зразка ґрунту після контрольної сушки може також служити джерелом виникаючої помилки, рівної приблизно 0,3 % в абсолютних і 1,5 % у відносних одиницях.

Таким чином, оцінки погрішностей визначення вологості ґрунту за допомогою термостатно-вагового методу показують, що використання його як еталонного цілком обґрунтовано внаслідок малої інструментальної погрішності цього методу.

Необхідно зазначити, що в польових умовах при температурі повітря 25 °С і більше вологість ґрунту в закритих бюксах через 6 годин меншає приблизно на 0,12 г і більше, що може вносити додаткову погрішність в її визначення і обмежує тривалість зберігання ящиків з сушильними бюксами і вологим ґрунтом. При проведені визначень необхідно також у перші 2–3 години сушки вологих зразків ґрунтів у термостаті тримати його дверці відчиненими для кращого виходу пароподібної вологи.

Термостатно-ваговий метод визначення вологості ґрунту являється простим і надійним, але він має деякі обмеження при його застосуванні:

1) не має неперервності в спостереженнях за зміною вологості ґрунту, оскільки кожний раз зразки ґрунту беруться з нової свердловини; 2) визначається вологість невеликого зразка ґрунту, а результат розповсюджується на порівняно великі площі (поля), тому необхідно мати достатню кількість повторних виборок зразків; 3) процес виймання зразків громіздкий і трудомісткий, отже повторність і терміни спостережень можуть бути обмеженими; 4) результати визначення вологості ґрунту стають відомими не відразу, а тільки після висушування його зразків.

4.1.2 Посередні методи визначення вологості ґрунту

Посередні (непрямі) методи визначення вологості ґрунту за принципами, що закладені в їх основу, можуть бути поділені на чотири групи:

1) засновані на теплових властивостях ґрунту;

2) на електроопорі;

3) на капілярному натягненні ґрунтової вологи;

4) методи, засновані на здатності ґрунтової вологи ослабляти проходяче через ґрунт гамма-проміння і перетворювати швидкі нейтрони в повільні – теплові. Ці методи являються перспективними і удосконалюються.

До числа методів, що не отримали подальшого розвитку, відносяться: дистиляційний, екстракційний, карбідний, оптичний, пікнометричний, метод додатково зволоження ґрунту, діелектричний та ін. Ці методи не отримали розвитку, головним чином, тому, що вони не виключають найбільш трудомістку частину роботи – виймання зразків ґрунту в полі. Разом з тим вони вимагають обладнання, що дорого коштує, а це ускладнює організацію масових польових визначень вологості ґрунту.

У методах, заснованих на теплових властивостях ґрунту, як показники її вологості використовується теплоємність, теплопровідність ґрунту і термічний критерій А. Ф. Чудновського.

Питома теплоємність більшості ґрунтів в сухому стані становить приблизно 0,84 кДж/(кг·К), а води – 4,2 кДж/(кг·К). Отже, із збільшенням вологості питома теплоємність ґрунту повинна зростати. Однак, в польових умовах неможливо визначити теплоємність ґрунту з достатньою точністю. Крім того, теплоємність дуже повільно змінюється із зміною вологості. Тому метод, заснований на цьому принципі, має невелику чутливість і тому не отримав подальшого розвитку.

Прилад для вимірювання вологості ґрунту по теплопровідності являє собою електричний зонд, що закладається в ґрунт, – всередині якого знаходиться біфілярно намотана спіраль з дроту з великим питомим опором. Спіраль включена в ланцюг джерела постійного напруження послідовно з міліамперметром. Поблизу зонда, паралельно йому, встановлюються два термометри опору. Знаючи відстань осей термометра від осі зонда і силу струму, що зігріває спіраль зонда, розраховують коефіцієнт теплопровідності ґрунту. Головною причиною, що утрудняє використання теплопровідності як критерію для визначення вологості ґрунту, є те, що швидке зростання теплопровідності із збільшенням вологості має місце тільки при невеликих значеннях останньої; вже при середній вологості ґрунту її теплопровідність не виявляє скільки-небудь помітного зростання із збільшенням вологості. А.Ф. Чудновський запропонував новий комплексний термічний критерій для визначення вологості ґрунту

$$y = \sqrt{fc\rho}\,,\ y = \sqrt{fc\rho} \qquad (4.1)$$

де y – новий термічний критерій;

f – коефіцієнт теплопровідності;

c – питома теплоємність;

ρ – щільність.

А.Ф. Чудновським був побудований відповідний прилад. Його позитивна сторона – висока чутливість і широкий діапазон вологості ґрунту, що враховується. Однак, поки що цей прилад для масових польових визначень вологості ґрунту неприйнятний. Головними причинами цього являються: залежність показання приладу від щільності ґрунту, яка в орному шарі дуже мінлива; необхідність градуювання приладу для кожного ґрунту і кожного його шару; порівняно складна методика вимірювань і складна для експлуатації в польових умовах апаратура.

Метод вимірювання вологості ґрунту за допомогою електроопору (омічний), заснований на зростанні електроопору ґрунту із зменшенням його вологості. Вимірювання вологості ґрунту цим методом зводиться до вимірювання опору між електродами, заглибленими в ґрунт. Діапазон дії цього методу широкий: омічним методом можна вимірювати вологість ґрунту в межах від найменшої вологоємності до коефіцієнта в'янення і навіть ще трохи нижчих значень вологості ґрунту. Метод застосовується для вимірювання вологості лише талих ґрунтів, оскільки при замерзанні ґрунтів спостерігається різке збільшення опору.

Перевага омічного методу – можливість забезпечити безперервність спостережень в одних і тих же точках протягом усього періоду та дистанційність спостережень. Основною трудністю цього методу являється необхідність тарування для кожного шару ґрунту, в якому визначається вологість. Потрібне також внесення поправок на температуру ґрунту. Пояснюється це тим, що електроопір ґрунту залежить не тільки від його вологості, але і від температури. На величину електроопору впливає також концентрація ґрунтового розчину та щільність ґрунтових часток. Однак, методика введення кількісних поправок на дію цих чинників поки що не створена.

Одним з приладів для вимірювання вологості ґрунту за допомогою електроопору є омічний вологомір ІВП-53, сконструйований А.І. Даніліним. Ґрунтовий вологомір ІВП-53 складається з комплекту датчиків і мегометра. Кожний датчик має два вугільних електроди, розділених між собою ізоляційними прокладками з ебоніту, текстоліту або вініпласту. Електроди обгорнені ниткою із скловолокна. Скловолокно має величезну питому поверхню і при тісному зіткненні з ґрунтом приймає однакову з ним вологість, тому за допомогою опору вугільних електродів можна визначати електроопір дотичного зі скловолокном ґрунту, а тим самим і його вологість.

Закладення датчиків в ґрунт в полі проводиться на всі глибини, на яких буде вестись вимірювання вологості ґрунту. Для установки кожного датчика робиться свердловина буром до глибини закладення датчика. На дно свердловини закладається заздалегідь змочений датчик, який потім засипається вийнятим з цієї глибини ґрунтом. Ґрунт злегка трамбується, щоб забезпечити надійний стик скловолокна з ґрунтом. Датчики залишаються в полі на весь період спостережень, в тому числі і на зиму, хоч відліки по них з

моменту замерзання ґрунту припиняються.

Тарування приладу може бути польовим і лабораторним. Польове тарування зводиться до паралельних вимірювань вологості ґрунту омічним методом і методом сушки зразків з одночасним відліком температури ґрунту. При таруванні необхідно отримати відліки при різній вологості ґрунту, починаючи від коефіцієнта в'янення і навіть трохи нижчих значень вологості ґрунту до її найменшої вологоємності. Це звичайно складає не менше 15–20 паралельних визначень, що охоплюють майже весь вегетаційний період. Лабораторне тарування кожного датчика проводиться на зразку ґрунту, вийнятому з тієї частини ділянки і з тієї ж глибини, куди буде закладатися даний датчик. При лабораторному таруванні проводиться серія паралельних визначень вологості та омічнго опору зразка ґрунту в межах зволоження його від насичення до повітряно-сухого стану.

Метод визначення вологості ґрунту по капілярному натягненню заснований на зростанні капілярного натягнення із зменшенням вологості ґрунту. Вимірювання вологості ґрунту цим методом зводиться до вимірювання вакууму, що створюється в приладі внаслідок відсмоктування з нього води ґрунтом. Вимірювання проводяться за допомогою манометра, герметично сполученого з вміщеною в ґрунт наповненою водою тонкопористою посудиною. Прилади цього типу називаються гідросорбентами або тензіометрами.

Один з таких приладів конструкції К.Н. Шишкова представлений на рис. 4.1. Основною робочою частиною приладу є керамічний фільтр, що забезпечує зв'язок між водою, що заповнює прилад, і водою ґрунту. Дно фільтра пористе з діаметром пор, що не перевищують 1,0-1,5 мк. Бічні стінки фільтра покриті поливою і непроникні для води і повітря. Мідна або латунна трубка з внутрішнім діаметром 8-10 мм служить для установки фільтра в ґрунт на певну глибину і з'єднує фільтр зі скляним балоном повітроуловлювача. Останній служить для заповнення приладу водою і звільнення його від повітря, що проникло в прилад. Для цього у верхній частині повітроуловлювача є отвір, що закривається гумовою пробкою. У повітроуловлювача є два відростка, які служать для з'єднання його з металевою трубкою та з манометром. Манометр являє собою U-образну товстостінну скляну трубку висотою 800 мм, внутрішнім діаметром 1,5 мм, наповнену добре обчищеною ртуттю.

Всі частини приладу герметично сполучаються між собою відрізками вакуумностійкої гумової трубки. Кераміка, мідна трубка, повітроуловлювач і вільна від ртуті частина сполученого з повітроуловлювачем коліна манометричної трубки заповнюються водою. В залежності від міри зволоження ґрунту, відповідно до різниці натягнення в кераміці і ґрунті, вода пересувається з ґрунту в прилад або з приладу в ґрунт, що спричиняє утворення або заповнення вакууму і відмічається зміною тиску в приладі.

Діапазон роботи цих приладів обмежений. Верхньою межею є капілярне

насичення ґрунту, оскільки в цьому випадку капілярне натягнення в ґрунті близьке до нуля. Нижньою межею є вологість ґрунту, при якій капілярна вода втрачає свою суцільність, практично вона трохи вище за вологість в'янення, тобто тієї вологості, при якій наступає стійке в'янення рослин. Це відповідає зменшенню тиску в приладі приблизно на 785 гПа. Розрахунок капілярного натягнення для приладу з ртутним манометром проводиться по формулі

$$K = 1{,}36\,(h_1 - h_2) - 0{,}1\,h_1 - H, \qquad (4.2)$$

де K – капілярне натягнення, см вод. ст.;

h_1 – висота ртуті в герметично сполученому з керамікою коліні, мм;

h_2 – висота ртуті у відкритому коліні манометра, мм;

коефіцієнти 1,36 – щільність ртуті, поділена на десять;

0,1 – коефіцієнт для перерахунку міліметрів в сантиметри;

H – глибина установки кераміки в ґрунт, см.

Польові спостереження по приладах цього типу зводяться до відліку показання манометра. Тарування приладів можливе як в польових, так і в лабораторних умовах. Позитивні сторони методу – безперервність спостережень в одних і тих же точках та простота відліків; негативні – обмеженість діапазону вологості, що враховується і необхідність тарування приладу. Потрібно підкреслити, що тензіометри найбільш придатні при спостереженнях над вологістю ґрунту в поливних умовах, оскільки вологість ґрунту в цих умовах звичайно не вийде за межі дії приладу.

Радіоактивні методи визначення вологості ґрунту можуть бути поділені на два види: метод визначення вологості ґрунту за допомогою гамма-променів і нейтронний метод.

Метод вимірювання вологості за допомогою *гамма-променів* оснований на тому, що гамма-проміння, проходячи крізь постійний шар ґрунту, ослаблюється. Ослаблення складається з постійного ослаблення, що викликається самим ґрунтом, та ослаблення, що міняється в залежності від кількості води, яка знаходиться в ґрунті. Таким чином, вимірювання вмісту води в даному шарі ґрунту може бути визначене по ослабленню гамма-променів, що проходять через цей шар.

У побудованому А.І.Даниліним за цим принципом приладі М-30-М (ІВП-64), як джерело гамма-променів використовується радіоактивний Co^{60}. Вимірювання вологості ґрунту здійснюється за допомогою вертикального пучка гамма-променів, що проходять через постійний шар ґрунту. Середня енергія Co^{10} становить 1,25 МеВ, період напіврозпаду – 5,3 роки. Таким чином, активнісгь препарата, що використовується в приладі за кожний місяць меншає приблизно на 1% первинної. Щоб виключити помилку, що викликається цим, в методиці вимірювання передбачений систематичний контроль приладу по контрольному препарату Co^{60}.

Чутливим елементом до гамма-променів в приладі М-ЗО-М є лічильник

ядерних часток. Підведене напруження до лічильників дорівнює 400 В. Рахування кількості імпульсів (гамма-квантів), виникаючих у лічильнику ядерних часток під дією гамма-променів, здійснюється за допомогою спеціального переносного електромеханічного лічильника. Оскільки інтенсивність гамма-променів спадає обернено пропорційно квадрату відстані, при вимірюванні необхідно стежити за тим, щоб відстань між джерелом гамма-променів (Co^{60}) та лічильником ядерних часток зберігалася постійною.

Прилади М-ЗО-М дозволяють вимірювати вологість ґрунту у всьому діапазоні від повного насичення вологою до повітряно-сухого його стану з точністю ±1,5-2,0 % ваги абсолютно-сухого ґрунту.

Найбільш розроблений варіант визначення вологості ґрунту цим приладом, дозволяє враховувати кількість вологи в шарах ґрунту: 0-25, 25-50, 50-75, 75-100, 0-50, 50-100 і 0-100 см (шляхом підсумовування запасів вологи в шарах 0-25 і 25-50 см, 50-75 і 75-100 см, 0-50 і 50-100 см). Для цього в ґрунт під кутом 45° в одній площині закладаються дві труби: верхня з них використовується для занурення в ґрунт ізотопу, а нижня – для занурення лічильника типу СТС-6.

При проведенні спостережень ізотоп Co^{60} за допомогою рейки опускають в трубу спочатку на глибину 25 см, потім на глибини 50, 75 і 100 см, відповідно вміщуючи лічильник гамми-променів спочатку на рівень поверхні ґрунту, потім на глибини 25, 50 і 75 см (рис. 4.2). При опусканні ізотопу і лічильника на кожну із вказаних глибин проводиться двократний відлік кількості імпульсів протягом двох хвилин по електромеханичному лічильнику типу МЕС-54.

Спостереження приладом М-30-М, як і спостереження методом сушки зразків ґрунту, проводяться на кожному полі в чотирикратній повторності. Терміни спостережень приладом М-30-М у зв'язку з меншою трудомісткістю можуть бути частіщими.

Оскільки вимірювання вмісту води в ґрунті визначається по зміні ослаблення гамма-променів, при установці приладу в полі проводяться паралельні відліки інтенсивності гамма-променів, що проходять через вищезгадані шари ґрунти, і визначення кількості води, що є в них в цей момент. Таким чином, визначається «початкова» інтенсивність гамма-променів і «початкові» вологозапаси. У будь-який інший момент вимірюється інтенсивність гамма-променів, проникаючих крізь кожний із вказаних шарів ґрунту, і після внесення поправки на розпад, по співвідношенню з початковою їх інтенсивністю розраховують зміни вологозапасів.

Шляхом алгебраїчного підсумовування початкових запасів вологи в ґрунті із зміною їх визначають вологозапаси в момент вимірювання. Для розрахунків змін запасів вологи по зміні інтенсивності гамма-променів використовуються спеціально складені для цього таблиці.

Цей метод, як і описані вище, забезпечує безперервність спостережень, отримання результатів спостережень відразу ж після відліків та малу

трудомісткість роботи в порівнянні з методом сушки. Основною перевагою методу гамма-променів в порівнянні з іншими, непрямими методами є незалежність результатів, що отримуються від інших сильно варіюючих в часі властивостей ґрунту, а також обхват спостереженнями всього діапазону вологості ґрунту в природних умовах.

Нейтронний метод оснований на вимірюванні потоку повільних (теплових) нейтронів, що утворюються в ґрунті внаслідок поглинання і розсіяння потоку швидких нейтронів в результаті їх взаємодії з ядрами атомів різноманітних речовин ґрунту. Найбільш ефективно швидкі нейтрони взаємодіють з легкими ядрами атомів (насамперед з ядрами атомів водню). Це зумовлює одних із головних недоліків нейтронного методу, розсіяння швидких нейтронів відбувається не тільки внаслідок їх взаємодії з ядрами водню вільної води, але і з ядрами водню, що входять до складу хімічних сполук, зокрема, глинистих мінералів монтморілоніту, каолініту, гідрослюд та ін.

Різний вміст в глинистих мінералах гідроксильних груп OH^-, куди входять атоми водню, і де відбувається сповільнення швидких нейтронів, при інших рівних умовах зумовлює різну кількість вологи в ґрунті. Крім цього, на поглинання швидких нейтронів істотно впливає наявність поглиначів нейтронів: літію, бору, хлору, заліза, гумусу та ін.

Принцип роботи нейтронного індикатора вологості (НИВ-1), розробленого В.А. Ємельяновим, полягає в наступному (рис. 4.3). У свердловину 3, обсаджену дюралевою трубою діаметром 50 мм, опускається на задану глибину каротажний снаряд 4, що складається з джерела випромінювання швидких нейтронів 7 і лічильників випромінювання 5, захищених від прямого опромінення нейтронами свинцевою прокладкою 6. Швидкі нейтрони, проникаючи в ґрунт, стикаються з ядрами водню, що входить до складу ґрунтової вологи, і вибивають з цих ядер повільні, теплові нейтрони, частина яких внаслідок хаотичного руху попадає на лічильники і фіксується перелічильним пристроєм 2. В залежності від вологості ґрунту буде мінятися і кількість нейтронів, що досягають лічильників. Таким чином, фіксуючи інтенсивність рахунку і маючи тарувальну криву зв'язку цієї характеристики з вологістю ґрунту (крива постачається разом з приладом), отримують пошукову величину – вологість в об'ємних процентах.

Нейтронний метод являється по суті абсолютним, тобто за його допомогою можна вимірювати вміст вологи в одиниці об'єму. Однак, він вимагає ретельного градуювання. Звичайно для градуювання нейтронних вологомірів використовується термостатно-ваговий метод з одночасними визначеннями щільності ґрунтів. В порівнянні з іншими приладами визначення вологості ґрунту, нейтронні вологоміри мають такі переваги: вимірювання вологості ґрунту у всьому діапазоні не залежить від агрегатного стану ґрунту; швидкість вимірювань; можливість повторних вимірювань в одній точці та автоматизації робіт. Цим приладам властиві і деякі недоліки: великий діаметр

осреднення вологості ґрунту (30–60 см); необхідність ретельного градуювання на кожній новій точці вимірювання; приймання спеціальних заходів при зберіганні та транспортуванні (останнє в новій модифікації усунене); досить велика (біля 2–3 %) погрішність визначень. Крім цього, установлення нейтронних вологомірів на полях, що обробляються заважає проведенню агротехнічних заходів, викликає необхідність періодичної переустановки обсадних труб. Тому застосування нейтронних вологомірів обмежене постійними спостережними ділянками, полями, на яких агротехнічні заходи не проводяться. Буде також доцільним використання нейтронних волдогомірів при проведенні автомаршрутних обстежень, коли вимірювання вологості носить разовий характер. До інших утруднень використання нейтронного методу потрібно віднести високу вартість апаратури, її складність, що зумовлює необхідність досить кваліфікованого спеціального обслуговування.

Більш перспективним потрібно вважати *електродинамічний метод* вимірювання вологості та солоності ґрунту, що запропоновано Ю.І. Лещанським. Створений на його основі макет являє собою портативний вологомір, який працює на довжині хвилі 1,8 см. На цій ділянці спектра радіовипромінювання величина часток ґрунту і вміст солей не впливають на показання приладу, істотним є вплив радіояскравісної температури та щільності ґрунту. Вплив радіояскравісної температури враховується її вимірюванням, щільність ґрунту – підбором такої відстані між хвилеводами, при якому вплив щільності ґрунту виключається. Хвилевід представляє собою пристрій розмірами менше 4-х см. За допомогою цього приладу можна вимірювати вологість як на поверхні ґрунту, так і на глибинах. У останньому випадку бурять свердловину і періодично опускають в неї хвилевід.

При вимірюваннях вологість ґрунту відразу виражається в процентах від об'єму. Погрішність вимірювання становить 3-4 відносних процента, тобто вона майже дорівнює погрішності визначень вологості ґрунту в точці за допомогою термостатно-вагового методу. Спосіб вимірювань досить простий. Він може використовуватися при автомаршрутних обстеженнях стану сільськогосподарських культур, при вимірюванні вологості на постійних спостережливих майданчиках (з використанням струмонепровідних обсадних труб), а також при оперативному вимірюванні вологості ґрунтів.

4.2 Методи вимірювання вологості ґрунту на великих площах

В основі більшості дистанційних методів вимірювання вологості ґрунту лежить реєстрація проникаючих електромагнітних випромінювань як природного, так і штучного походження в широкому діапазоні довжин хвиль – від сантиметрового до гамма-випромінювання (10^{-11}см), включаючи область видимого, ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання в залежності від властивостей вивчаємого об'єкта. До них відносяться метод авіаційної гамма-зйомки, метод СВЧ-радіометрії (пасивна радіометрія) та

електродинамічний метод (активна радіометрія ґрунтів).

4.2.1 Авіаційна гамма-зйомка вологості ґрунту

Авіаційна гамма-зйомка вологості ґрунту заснована на ефекті послаблення ґрунтовою вологою гамма-випромінювання природних радіоактивних елементів ґрунтів. Якщо розглядати ґрунт як однорідний випромінюючо-поглинаючий напівпростір, то для первинних (нерозсіяних) гамма-променів природних радіоактивних елементів, які повсюдно поширені в ґрунті, буде справедливим такий вираз

$$I = I_o \frac{1}{I + k'W}, \tag{4.3}$$

де I – інтенсивність нерозсіяних гамма-квантів на висоті h при відносній вологості W; I_o – інтенсивність гамма-квантів на тій же висоті при $W = 0$; k – коефіцієнт, який дорівнює 1,11, що враховує відмінність поглинаючих властивостей ґрунту і води.

Внесок шарів ґрунту, що розташовані на різній глибині, в загальний потік гамма-квантів не однаковий. Він зменшується з глибиною згідно експоненціальному закону зі швидкістю, що залежить від енергетичного складу випромінювання, яке реєструється. Більша частина (90-95 %) сумарного потоку гамма-випромінювання ґрунтів в усьому енергетичному інтервалі випромінюється поверхневим шаром ґрунту товщиною 20-30 см. Отже, при однорідному розподілі в цьому шарі ґрунту гамма-випромінюючих елементів і зволоження можна за вимірюваннями інтенсивності I цілком однозначно визначити вміст вологи в ґрунті, якщо відоме значення I_o. Пряме вимірювання I_o не може бути виконане, оскільки ґрунт завжди зволожений. Значення I_o можна розрахувати, якщо один раз провести одночасні вимірювання I_1 і вологость W_1 (яким-небудь контрольним способом), а надалі, вимірюючи тільки I, розраховувати вологість W за виразом

$$W = \frac{I_1}{I}\left(\frac{1}{k'} + W_1'\right) - \frac{1}{k'}. \tag{4.4}$$

Середньо-квадратична погрішність розрахунку W у виразі (4.4) має такий вигляд:

$$\Delta_W = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_{I_1}^2 + \Delta_{W_1'}^2}. \tag{4.5}$$

де Δ_{I_1} і $\Delta_{W_1'}$ – випадкові погрішності первинних одночасних визначень вологості ґрунту та інтенсивності гамма-випромінювання.

При визначенні вологості методом авіаційної гамма-зйомки ці погрішності, які оцінені один раз, надалі будуть систематичними. Вони в значній мірі залежать від величин погрішностей при проведенні наземних контрольних визначень вологості ґрунтів.

Інший спосіб градуювання авіаційних вимірювань пов'язаний з визначенням нульових значень інтенсивності гамма-випромінювання сухого ґрунту. Для їх визначення відбираються зразки ґрунту на окремих сільськогосподарських полях, висушуються в термостаті при 105 °С і за допомогою лабораторної радіометричної установки знаходиться вагова концентрація природних радіоактивних елементів, яка пропорційна I_o. Коефіцієнт пропорційності між ваговою концентрацією радіоактивних елементів у висушеному ґрунті та інтенсивністю їх гамма-випромінювання встановлюється для кожного поля окремо шляхом спеціальних калібрувальних вимірювань. При використанні цього способу істотну роль грає достовірність оцінки вмісту радіоактивних елементів у відібраних зразках по відношенню до смуги вимірювань вологості з літака, яка по ширині дорівнює трьом висотам польоту літака.

При цьому як детектор гамма-випромінювання застосовуються сцинтиляційні спектрометричні лічильники, відмінні високою чутливістю до корисного випромінювання, відносно низьким рівнем перешкод і порівняно високою енергетичною розв'язучою здатністю. Використовується однокристальний сцинтиляційний лічильник на кристалі йодистого натрію діаметром 150 мм і висотою 100 мм.

Метод авіаційної гамма-зйомки, має ряд переваг перед іншими методами, але також має і суттєві недоліки. До його переваг можна віднести оперативність, продуктивність, можливість визначень незалежно від щільності ґрунтів і агрегатного стану вологи, можливість визначень на будь-яких, в тому числі і болотних ґрунтах. До недоліків цього методу потрібно віднести: недостатню глибину вимірювань вологості (20-30 см), невизначеність глибини, велику погрішність вимірювань (2-3%), необхідність ретельного градуювання.

4.2.2 СВЧ-радіометричний метод

Одним з ефективних методів зондування поверхневих площ Землі в радіодіапазоні являється СВЧ – радіометричний метод, який оснований на вимірюванні власного випромінювання об'єктів природного середовища в діапазоні міліметрових, сантиметрових і дециметрових хвиль. Основна перевага радіохвиль перед хвилями оптичного та інфрачервоного діапазонів полягає в їх високій проникаючій здатності. Хвилі радіодіапазону слабо поглинаються і розсіюються в атмосфері, внаслідок чого радіофізичні методи дослідження земної поверхні являються незалежними від погоди. В залежності від довжини електромагнітної хвилі і конкретного радіофізичного

методу радіохвилі здатні проникати всередину ґрунтів і забезпечувати їх зондування на глибину від декількох сантиметрів до декількох метрів.

Оцінка характеристик вологості земної поверхні методами СВЧ-радіометрії заснована на залежності інтенсивності, міри поляризації і проникаючої здатності електромагнітного випромінювання ґрунтів від діелектричних властивостей останніх, які визначаються вмістом вологи та особливостями її вертикального розподілу. Інтенсивність власного випромінювання поверхні в СВЧ-діапазоні характеризується яскравісною температурою $T_я$, яка визначається як добуток коефіцієнта випромінювання k середовища на її ефективну температуру T_e:

$$T_я = kT_e . \qquad (4.6)$$

Коефіцієнт випромінювання однорідного по глибині середовища, яке обмежене плоскою поверхнею, на довжині електромагнітної хвилі λ описується за допомогою відбивних формул Френеля. Вони включають в себе такі характеристики середовища як комплексна діелектрична проникність, значення кута спостереження і вигляд поляризації. Діелектричні характеристики ґрунтів визначаються вологовмістом, щільністю, їх механічним складом, концентрацією та складом солей, температурою.

Діелектрична проникність сухого ґрунту залежить від його щільності. Проникність зволоженого ґрунту оцінюється виходячи із співвідношень теорії багатокомпонентних сумішей. Із збільшенням вологовмісту діелектрична проникність росте, однак при вологості менше 5 % вона практично не залежить від довжини хвилі. Діелектрична проникність вологого ґрунту слабо залежить від щільності ґрунту, а при вологості більше 10 % починає залежати від температури. На ґрунтах легкого механічного складу вона зменшується. Основним параметром, що визначає діелектричну проникність ґрунту, є вологість ґрунту, що становить її доступну частину.

Перепад рівнів радіовипромінювання сухого ґрунту і ґрунту в стані повної вологоємності при вертикальному спостереженні становить 60-90 К. Глибина зондування при різних значеннях діелектричної проникності на довжинах хвиль 10-30 см складає для глинистих ґрунтів 5-50 см, для супісчаних і піщаних 10-200 см при зміні вологості верхнього шару від 4 до 12 %. При збільшенні довжини хвилі глибина шару, що зондується буде збільшуватись. Просторово-розв'язувальна здатність методу визначається розмірами антени і складає при її довжині 1 м та висоті польоту 300 м біля 75 м^2. Вплив великих в порівнянні з довжиною хвилі нерівностей на характеристики поля випромінювання при кутах спостереження $40° \geq \Theta \geq 0$ незначний. Розпушування ґрунту збільшує її яскравісну температуру внаслідок зменшення об'ємного вологовмісту при постійній відносній вологості ґрунту.

Результати одночасних радіометричних і контрольних наземних

вимірювань вологості ґрунтів, показують, що у 90 % випадках в широкому діапазоні зволоження ґрунтів погрішність радіометричних оцінок вологості не перевищує 6 % її абсолютного значення.

Основні переваги СВЧ-методу полягають в можливості вимірювання кількості доступної вологи (передбачається, що це вологість вище максимальної гігроскопічності) в об'ємних процентах, тобто метод дозволяє відразу отримувати продуктивні вологозапаси ґрунтової вологи, виражені в міліметрах водного шару без додаткових визначень щільності і вологості в'янення ґрунтів. При цьому допускається, що об'ємні проценти і міліметри водного шару вологи для 10-ти сантиметрових шарів ґрунту чисельно рівні.

Лінійні розміри поля зору приладу 50-150 м є достатніми для забезпечення репрезентативності вимірювань вологості ґрунту в смузі спостережень і на всьому полі. Метод являється оперативним, за його допомогою можна отримувати усереднені дані про вологість ґрунту на всьому полі, а також дискретні дані по смузі спостережень на ділянках протяжністю біля 100 м. Авіаційновому СВЧ-методу властивий і цілий ряд недоліків. Глибина вимірювань вологості на глибині 20-30 см, обмежує застосування СВЧ-методу в ранні періодами вегетації сільськогосподарських культур. Досить великою є погрішність вимірювань – не більше за 6 % або 0,05 г/см^3. У 30-ти сантиметровому шарі ґрунту така погрішність становитиме 15 мм вологи. Обмежує використання методу і наявність рослинності, під впливом якої зростає погрішність вимірювань вологості ґрунту.

4.2.3 Електродинамічний метод

Одним з перспективних методів визначення вологості ґрунту є вимірювання коефіцієнта відбиття ґрунту при вертикальному падінні на нього радіохвиль метрового діапазону. На відміну від СВЧ-методу, при використанні якого вимірюється пасивне випромінювання підстилаючої поверхні, даний метод дозволяє вимірювати активне випромінювання. Глибина проникнення в ґрунт радіохвиль метрового діапазону більше, ніж сантиметрового, внаслідок цього інформація про вологість ґрунту може бути отримана на глибинах до 100-150 см, тобто по всій глибині розповсюдження кореневої системи.

Фізичною основою електродинамічного методу, як і СВЧ-методу, є залежність діелектричних і омічних втрат полів ближньої зони антен від вологості ґрунту. Існує декілька модифікацій цього методу, що розрізнюються в основному виглядом і розташуванням дипольних антен. Залежність діелектричної проникності ґрунту від його вологості встановлена експериментально і виражається формулою

$$\varepsilon = NW+2, \qquad (4.7)$$

де ε – діелектрична проникність ґрунту; коефіцієнт N дорівнює: 0,5 – для супісчаних, 1,0 – для суглинистих і 1,5 – для глинистих ґрунтів.

Залежність електропровідності від вологості має нелінійний характер

$$W = a\delta^2 + b, \tag{4.8}$$

де δ – електропровідність ґрунту;

b – маломінлива величина,

a – сильномінлива з глибиною величина.

Таким чином, існують два методи непрямих вимірювань вологості – шляхом рішення рівнянь (4.7) або (4.8). При середніх і невеликих значеннях вологості ґрунту краще використати зв'язок діелектричної проникності з вологістю, тобто рівняння (4.7). У цьому випадку необхідні дві антени: електрична і магнітна, комбінація яких дозволяє провести вимірювання безпосередньо на поверхні ґрунту. Висота підвішування антен мало впливає на точність вимірювань, однак краще розташовувати їх на невеликих висотах. Погрішність вимірювань активної складової вхідного опору антен становить 5-7 %, похибка вимірювання вологості становить половину цієї величини, тобто приблизно 3-4 %. За товщину шару ґрунту, в якому вимірюється вологість, приймається шар, де зосереджено 90 % втрат потужності полів ближньої зони.

Макет портативного переносного вимірювального пристрою, за допомогою якого можна отримувати дані про вологість ґрунту безпосередньо з поверхні ґрунту складається з вимірювальної антенної системи і вимірника активної складаючої вхідного імпедансу антен. Антени розташовуються паралельно поверхні ґрунту, що забезпечує малу висоту їх підвішування (біля 0,2 м). Розміри рамкової антени 40×40 см, вона являє собою два витки мідної смужки товщиною 4 мм і шириною 10 мм. Електричний вібратор виконаний з мідного стержня товщиною 8 мм та довжиною 1 м (рис. 4.4). Електричне живлення макета здійснюється від чотирьох батарей типу 3336Л, маса вологоміра не більше за 4 кг. Площа, на якій вимірюється вологість, залежить від висоти падвішення антени і приблизно рівна площі першої зони Френеля

$$S = \frac{\pi\lambda h}{2}, \tag{4.9}$$

де S – площа, м^2;

λ – довжина хвилі, м;

h – висота підвішення антен, м.

При висоті підвішення антен 0,2 м та довжині хвилі 12,5 м площа ділянки вимірювань вологості складає біля 4 м^2. Остаточна похибка вимірювань вологості не буде перевищувати 10 % її значення, що вимірюється.

Розглянутим вище методом ведеться визначення вологовмісту ґрунту за допомогою антен, встановлених на висоті декількох метрів. При цьому вологість ґрунту може вимірюватися на площі 50-150 $м^2$. При довжині хвилі 3-5 м глибина зондування для сухого ґрунту буде складати 2-3 м, вологого – біля 0,5 м. Для визначення профілю вологості ґрунту вимірювання коефіцієнта відбиття ґрунту потрібно вести на декількох довжинах хвиль. Для визначення вологості в шарі 20-30 см вимірювання коефіцієнта відбиття необхідно провести на довжині хвилі 0,5-1 м, в шарі 0-50 см – на довжині хвилі 3 м, в шарі 0-100 і 0-150 см – на довжині хвилі 5-7 м.

Для вимірювань описаним методом необхідні: генератор немодульованих коливань УКВ-діапазону на одну або три фіксовані частоти потужністю біля 10 Вт, дві антени – диполі Герца та індикатор поля у вигляді контура з однією або трьома фіксованими настройками, детектором і мікроамперметром. Апаратура може бути встановлена стаціонарно або на автомашині типу УАЗ, а також на літаку.

Таким чином, в розглянутих вище двох способах вимірювання вологості шляхом вимірювання коефіцієнта відбиття в області УКВ показано, що цей метод має більш широкі перспективи в порівнянні з гамма-зйомкою і СВЧ-методом. До переваг цього методу, який можна назвати електродинамічним, або методом активної радіометрії, відносяться: можливість вимірювання вологості на всю глибину розповсюдження кореневої системи, отримання профілю вологовмісту ґрунту, можливості використання методу в наземному, переносному і стаціонарному, автомобільному та авіаційному варіантах, простота апаратури. Якщо до цього додати, що за допомогою методу активної радіометрії також як і СВЧ-методу, можна вимірювати кількість об'ємної доступної для рослин вологи, то легко представити, які широкі можливості для використання закладені в цьому методі. Однак для нього, так само як і для СВЧ-методу та авіаційної гамма-зйомки, необхідні спряжені вимірювання вологості ґрунту термостатно-ваговим методом для встановлення залежності коефіцієнта відображення від вологості ґрунту і для оцінки погрішності вимірювань.

4.3 Метод водного балансу ґрунтових монолітів

Цей метод застосовується в двох варіантах: для вивчення випаровування з верхнього шару ґрунтів за допомогою випарників, а також для вивчення витрати вологи в зону аерації (висхідного потоку), сумарного випаровування та інфільтрації лізиметрами.

4.3.1 Метод випарників

Метод випарників застосовується для вивчення випаровування з різних поверхонь: богарних та зрошуваних сільськогосподарських полів, боліт,

поверхні, зайнятої напівзануреною у воді рослинністю (зокрема, рисові плантації при зрошуванні методом затоплення).

В залежності від вигляду випарної поверхні, конструкції випарників і методи вимірювань бувають різними. Всі випарники мають водонепроникні дно і стінки зовнішнього корпусу, що перешкоджає водообміну моноліту з нижчерозташованою товщею ґрунту і навколишнім його ґрунтом. Приплив, відтік і скид поверхневих вод також відсутні, тому рівняння водного балансу моноліту ґрунту, що міститься у випарнику, має вигляд

$$X+M-E+\Delta W_h-I_h = 0 \qquad (4.10)$$

де X – опади;

M – норма зрошення;

E– сумарне випаровування і конденсація (по випарнику);

$\Delta W_h = W_{hн} - W_{hк}$ зміна вологозапасів в моноліті випарника;

I_h – інфільтрація за межі моноліту випарника.

Через неможливість врахування вологообміну верхнього шару ґрунту з нижнім, випарники непридатні для вивчення випаровування із зрошуваних полів, а також з усіх інших угідь, де ґрунтові води залягають неглибоко (менше 3-5 м) і активно беруть участь в підживленні вологою діяльного шару ґрунту.

Найбільш широке поширення отримали випарники, призначені для вимірювання випаровування з сільськогосподарських угідь – вагові та гідравлічні випарники. Гідравлічні випарники мають високу точність вимірювань і тому на даному етапі вважаються найбільш довершеними приладами.

Гідравлічний випарник великої моделі розроблений В.А. Уриваєвим. Випарна площа випарника дорівнює 5 м^2, висота моноліту 2 м. Цей випарник є унікальним приладом. Він дозволяє визначати часові величини випаровування і використовується як еталон для оцінки надійності вимірювань цього елемента іншими методами, а також для різних науково-дослідних цілей.

Для широкого використання на мережі гідрометеорологічних станцій розроблена конструкція гідравлічного ґрунтового випарника малої моделі (ГГВ). У гідравлічному випарнику малої моделі зміна вологозапасу моноліту визначається по мірі занурення його відносно рівня води в баку, в якому плаває випарник. При цьому використовується рівність, яка лежить в основі принципу гідростатичного зважування:

$$\Delta P = \Delta i\, F\, \rho_{ж}, \qquad (4.11)$$

де ΔP – зміна ваги плаваючого тіла;

Δi – величина зміни міри занурення тіла під впливом зміни його ваги;

F – площа перетину плаваючого тіла в площині плавання;

$\rho_{ж}$ – щільність рідини, в якій плаває тіло.

Гідравлічний ґрунтовий випарник складається з трьох основних вузлів, плаваючої системи, бака і вимірювальних пристроїв мікровимірника і рівнеміра (рис. 4.5).

Плаваюча система приладу складається з випарника *1* з монолітом, чохла *13* кільцевого поплавця *8*. Випарник призначений для розміщення в ньому ґрунтового моноліту площею 2000 см^2 і висотою 1,5 м. Нижня частина чохла закінчується стержнем для навішування великих вантажів *15,* що служать для регулювання міри занурення плаваючої системи при ґрунтах моноліту, що мають різну об'ємну вагу і що підвищують її стійкість. Для теплоізоляції між стінками випарника і чохла є повітряний кільцевий зазор в 25 мм.

Кільцевий поплавець утримує лізиметр на плаву. Поплавець має три трубні шахти з гніздами *12,* в які вміщуються баластні вантажі 11. Останні служать для точного регулювання міри занурення плаваючої системи в процесі вимірювання випаровування при змінах ваги моноліту. На поверхні поплавця встановлені три вертикальні стойки для чашок *2* з ртуттю.

Плаваюча система навантажена в залізний або залізобетонний резервуар *9,* встановлений в ґрунті і наповнений водою. Стінка бака має напівкругле вертикальне поглиблення – гніздо для поплавця 7 рівнеміра, забезпеченого малими *10* і регулювальними 5 вантажами. Для усунення горизонтального переміщення і обертання в баку плаваюча система розчалена тросом *6* в три точки. Розчалка забезпечує вільне вертикальне переміщення плаваючої системи на ±40 мм, в цих межах допускається переміщення системи при вимірюваннях без її додаткового регулювання.

Бак з плаваючою системою закритий настилом *16* з отвором – горловиною для моноліту і допоміжними люками. На настил укладається 30-ти сантиметровый шар ґрунту, який при відповідному підживленні забезпечує нормальний ріст рослинності (після монтажу приладу), що служить біологічним фоном для рослинності, що виростає в моноліті.

Величина вертикального переміщення плаваючої системи відносно рівня води в баку (міра занурення випарника) визначається за допомогою вимірювальних пристроїв, трьох мікровимірників 3 плаваючої системи і рівнеміра (четвертий мікровимірник з поплавцем). Під кожним мікровимірником розташована чашка 4 з ртуттю, що знаходиться на кільцевому поплавці або на поплавці рівнеміра.

Для вивчення елементів водного балансу при неглибокому заляганні рівня ґрунтових вод прилад забезпечується водорегулюючим пристроєм *14.* Такий прилад називається гідравлічним ґрунтовим випарником–лізиметром (ГГВЛ). Відлік показання мікровимірника проводиться по лічильнику і лімбу з точністю до 0,5 поділки шкали, відповідного 0,05 мм вертикального переміщення.

Точність гідростатичного зважування моноліту гідравлічного

випарника, становить ±20 г, що відповідає 1/2500 маси, що зважується, тобто 0,1 мм шару води. Висока точність і порівняно простота в експлуатації гідравлічного ґрунтового випарника малої моделі дозволила рекомендувати його як основний прилад для вимірювання добових величин випаровування з різних сільськогосподарських культур.

Для масових спостережень за сумарним випаровуванням з різних сільськогосподарських угідь при глибокому заляганні ґрунтових вод Головним гідрологічним інститутом (ГГІ) рекомендовані найбільш прості прилади – випарники ГТВ-500-50 і ГГВ-500-100. Випарювальна площа ґрунтових монолітів 500 см^2, висота 50 і 100 см. Дно випарників ГГВ-500 знімне з отворами, через які вода, що просочилася крізь товщу моноліту, стікає у водозбірну посудину. Випарник зважується один раз в п'ять діб на поштовій малогабаритній вазі з точністю до 10-15 г, що в перекладі на шар води становить 0,2-0,3 мм. Підйом і опускання випарників в гніздо при зважуванні здійснюється найпростішим підіймальним пристроєм, що дозволяє проводити операції з випарниками на деякій відстані, щоб не витоптувати навколо них травостою.

Випарники ГГВ-500-50 рекомендуються для вимірювання випаровування з парових полів у всіх кліматичних зонах, а також з різних сільськогосподарських угідь в зонах достатнього та надмірного зволоження. Зміна монолітів проводиться через 10 діб. Випарники ГГВ-500-100 рекомендуються для вимірювання сумарного випаровування з різних сільськогосподарських культур в зоні недостатнього зволоження. У зоні надмірного і достатнього зволоження також потрібно застосовувати випарники з висотою моноліту 100 см, без зміни монолітів.

На зрошуваних землях вагові ґрунтові випарники типу ГГВ-500 непридатні, головним чином, за двох причинах: 1) на зрошуваних землях майже всюди спостерігається неглибоке залягання ґрунтових вод, де випарники, як вже вказувалося, не спрацьовують взагалі, оскільки вони виключають вертикальний вологообмін; 2) випарна площа 500 см^2 в умовах зрошуваних земель виявилася недостатньою для нормального росту зернових колосових культур, для яких ці випарники призначені.

Оптимальними розмірами випарної площі у випарниках для зрошуваних земель є для пару – 500 см^2, для зернових колосових культур – 750-1000 см^2, для просапних і овочевих культур – 2000-3000 см^2. Висота випарників 50 см цілком достатня для пару, а для с.-г. культур вона визначається глибиною проникнення кореневої системи і складає для зернових колосових 100 см, просапних – до 150 см, а для овочевих – 100 см

Для вивчення сумарного випаровування з рису запропонований випарник з вимірювальної бюреткою. Випарна площа випарників ГГВ-2000р і ГГВ-3000р відповідно дорівнює 2000 і 3000 см^2, висота 70 і 100 см (рис 4.6) У трьох точках на внутрішній стінці циліндра випарника *1* в 7-10 см від верхньої його кромки прикріплений кронштейн з гніздом в центрі для вимірювальної

бюретки *2*. Дно випарника *3* наглухо прикріплене до стінок і є непроникним.

Випарник заповнюється ґрунтом з порушеною структурою в тому порядку, в якому останній залягає в природних умовах. Рис висаджується у випарниках насінням або саджанцями. Точність вимірювання сумарного випаровування з рису випарниками ГГВ-2000р і ГГВ-3000р з бюреткою становить 0,1 мм.

Випадкові помилки вимірювання сумарного випаровування за допомогою ґрунтових випарників складають в середньому 10-15%. Систематичні помилки випарників (через підрізування коріння при перезарядці та перегріві моноліту в жарку погоду) при повній відповідності стану рослин в полі і випарниках у 80% випадків спостережень не перевищують величин випадкових помилок. При відсутності вказаної відповідності систематичні помилки досягають значно більших розмірів. Випадкові і систематичні помилки вимірювання сумарного випаровування за допомогою випарників для рису не перевищують 10 %.

Вагові ґрунтові випарники і випарники для рису можуть бути використані не тільки для визначення сумарного випаровування або випаровування з ґрунту, позбавленого рослинності, або з води при відсутності посівів рису, але і для визначення транспірації рослин як різниці між величинами сумарного випаровування і випаровування з ґрунту або водної поверхні. Можливість визначення транспірації є істотною перевагою методу випарників.

4.3.2 Метод лізиметрів

Лізиметр являє собою пристрій, в якому міститься елементарна частина зони аерації в натуральному масштабі по глибині і з моделлю водоносного шару, що, на відміну від випарників, забезпечує можливість вертикального вологообміну в моноліті.

Метод лізиметрів в принципі придатний для вивчення сумарного випаровування, витрати ґрунтових вод в зону аерації, поповнення запасів ґрунтових вод за рахунок інфільтрації у разі неглибокого залягання рівнів ґрунтових вод, коли діяльний шар поверхні знаходиться в зоні впливу капілярної кайми, що утворюється ґрунтовими водами.

Найпростіший лізиметр являє собою водонепроникний бак, поперечний перетин якого має круглу або прямокутну форму. Бак заривається в землю до верхньої кромки, в нього вміщується ґрунт, що досліджується. Вимірювальні пристрої в більшості випадків виконуються у вигляді спостережливих свердловин, через які доливається вода до постійного, зазделегідь наміченого рівня. Кількість води, що доливається приймається рівним випаровуванню; зміна вологозапасів в зоні аерації в цьому випадку не враховується.

Відомі лізиметричні установки, в комплект яких входить ряд лізиметрів, призначених для визначення елементів водного балансу на різних угіддях і

при різних глибинах залягання ґрунтових вод. Однак і в цьому випадку моноліти лізиметрів не зважуються.

Площа випарної поверхні лізиметра, що зважується дорівнює 0,2 м^2, висота моноліту може бути1,0; 1,5; 2,0; 2,5м. Таким чином, маючи в одному пункті спостережень чотири лізиметра, можна отримати залежність елементів балансу від глибини залягання водоносного горизонту в досить широкому діапазоні.

На відміну від випарників, в лізиметрах на деякій глибині створюють і автоматично підтримують постійний рівень ґрунтових вод (рис. 4.7). Зважування проводяться на платформеній вазі загального призначення. По зміні маси моноліту з урахуванням опадів, що випали, визначених по дощоміру, встановленому біля лізиметра, а також витрати і поповнення ґрунтових вод по водорегулюючому пристрою, розраховують випаровування з поверхні моноліту. Вимірювання кількості води, долитої в лізиметр або злитої з нього в процесі стабілізації рівня, показує відповідно витрату ґрунтових вод в зону аерації та їх поповнення за рахунок інфільтрації.

Точність вимірювання маси моноліту дозволяє визначати зміни вологозапасів з помилкою в 1 мм шару води. Помилка, з якою вимірюється витрата ґрунтових вод в зону аерації та їх поповнення за рахунок інфільтрації, не перевищує ±1 мм шару води. Величину випаровування по лізиметру розраховують за рівнянням водного балансу виду:

$$Z = 1/200(p_1 - p_2) + \Sigma X + \Sigma Q - \Sigma I, \qquad (4.12)$$

де p_1 і p_2 – маса лізиметра на початку і в кінці зважування, г;

ΣX – сума опадів за період між зважуваннями, мм;

ΣQ – витрата ґрунтових вод в зону аерації за період між зважуванями, що відповідає кількості води, поданої в лізиметр, мм;

ΣI – поповнення запасів ґрунтових вод за рахунок інфільтрації атмосферних опадів, що відповідає кількості води, відкачаної з моноліту, мм.

Результати вимірювань відображають хід випаровування в природних умовах тільки в тому випадку, якщо водний і тепловий режими монолітів відповідають водному і тепловому режимам ґрунтів в зоні аерації на навколишньому полі.

5 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІТОКЛІМАТУ ПОСІВІВ

5.1 Комплексні дослідження, що проводяться на спеціальному експериментальному полігоні

При вивченні фітоклімату сільськогосподарських полів, розробці агроекологічних моделей та в процесі виконання експериментальних досліджень згідно робіт М.Ф. Бондаренко, Є.Є Жуковського, І.Г. Мушкіна, С.В. Нерпіна, Р.О. Полуєктова, І.Б. Ускова розглядаються дві основні задачі:

– одержання інформації про закономірності мікрометеорологічного режиму рослинного покриву (РП).

– одержання початкової (вхідної) інформації про параметри, які використовуються при побудові моделей, та про взаємозв'язки між цими параметрами;

В процесі планування й організації експериментів особливе місце займають оцінки відповідності об'єкта польового експерименту реальному технологічному об'єкту (полю, теплиці і т.п.). Ці питання повинні детально розглядатися як при виборі найбільш придатного типу польового експерименту, так і при підготовці технічних засобів для одержання інформації в ході експерименту.

5.1.1. Репрезентативність агрометеорологічної інформаціїз дослідних полів

На всіх етапах проведення експериментів кількісні оцінки відповідності експериментального об'єкта реальному можуть бути отримані по репрезентативності одержуваної і використовуваної інформації. Оцінки репрезентативності проводяться на основі аналізу мінливості параметрів і характеристик засобів одержання інформації.

Загальні закономірності мінливості узагальнених параметрів ґрунту, рослини і мікроклімату в просторі приведені на рис. 5.1. Як міру простору взято масштаб дослідної ділянки (площа), а як міру мінливості параметрів – значення коефіцієнта варіації. Поділки шкали відповідають розмірам площ в основних типах експериментів: 0,1-1 м^2 – вегетаційні посудини і вегетаційні кліматичні камери; 1-10 м^2 – ґрунтові блоки модельних установок типу лізиметрів; 10-100 м^2 – ділянки у факторних дрібноділяночних експериментах для різних культур; 100-1000 м^2 – дослідні ділянки великоділяночних і напіввиробничих експериментів. Наступні градації відповідають виробничому експерименту в господарствах (від 1 до 100 га) та господарству в цілому (до 10 тис. га) і т.д.

Графік відображує відомі дані про мінливість параметрів. Так, наприклад, ґрунтові характеристики для площадок менш 10 м^2 практично не міняються в межах ділянки. В міру росту площі строкатість ґрунтових умов різко зростає, починаючи, з 10 га зростання площі не приводить до істотного росту варіації параметрів, тому що кількість ґрунтових відмінностей практично більше не збільшується.

Варіація характеристик рослин має граничне значення навіть для окремої рослини за рахунок розходження характеристик окремих органів. В міру збільшення кількості рослин на обліковій площі варіація параметрів росте, але при визначеному рівні їхньої кількості (яка дорівнює приблизно 1000 шт.) ріст варіації припиняється, і її значення стають статистично стійкими.

Варіація мікрокліматичних параметрів для невеликих ділянок майже не міняється, її мінливість порівняно мала. В міру росту досліджуваних площ варіація метеорологічних параметрів росте, що пояснюється різноманітністю рельєфу і рослинного покриву в межах облікової площі.

У такий же спосіб можна проаналізувати мінливість параметрів ґрунту, рослин і атмосфери в часі.

Основні ґрунтові характеристики протягом вегетаційного періоду практично не змінюються. Виключення складають щільність ґрунту, регульована шляхом обробок орного шару, і показники вологості ґрунту в шарі мешкання коріння, що мають добовий хід і міняються під впливом опадів.

Параметри самої рослини можуть бути розділені на дві групи.

До першої групи відносяться параметри, що міняються в часі безупинно (розміри, маса і т.п.). Внаслідок малих добових приростів, їх можна надійно визначати тільки для окремої рослини. З огляду на значну варіацію цих параметрів у межах дослідної ділянки, достовірні дані для експерименту в цілому можуть бути отримані з кроком у часі декілька днів.

Друга група – параметри рослин, що міняються дискретно (етапи органогенезу, фази розвитку і т.п.), визначаються з інтервалом часу 10-15 днів. Власне кажучи, параметри ґрунту і рослини в основному репрезентативні в межах 5-7 днів і більше.

Складніше оцінити репрезентативність у часі мікрокліматичних показників, оскільки турбулентний характер процесів обміну в приземному шарі повітря обумовлює широкий спектр коливань основних показників, що характеризують обстановку. Звідси випливає, що в кожному конкретному випадку технічні засоби одержання інформації та методику вимірів і обробку даних потрібно вибирати таким чином, щоб був забезпечений необхідний рівень репрезентативності.

У результаті досліджень мікроклімату рослинного покриву склалося

уявлення про розподіл агрометеорологічних параметрів. На підставі цих уявлень сформульовано головні балансові співвідношення, що зв'язують характеристики мікроклімату РП, і вертикальні профілі розподілу параметрів мікроклімату для системи "грунт - рослина - атмосфера", які приведені на рис.5.2-5.8. Заштриховані області в кривих розподілу орієнтовно обмежують зони пульсаційних змін параметрів; у деяких випадках зазначена ширина смуги частот, що активно беруть участь у процесах обміну. Деякі параметри (парціальний тиск водяної пари, температура, концентрація вуглекислого газу) представлені розподіленням в денні та нічні години доби.

Розглянемо послідовне формування характеристик радіаційного, водного, газового, вітрового режимів посівів та режиму мінерального живлення.

Радіаційний режим посіву.

Радіаційний баланс рослинного покриву формується за рахунок потоку сумарної радіації, потоку відбитої радіації і довгохвильового випромінювання підстильної поверхні:

$$R_б = Q - R_0 - F_s, \tag{5.1}$$

де $R_б$ – радіаційний баланс;

Q – сумарна радіація;

R_0 – відбита радіація;

F_s – довгохвильове випромінювання підстильної поверхні.

Потік сумарної сонячної радіації складається з потоків прямої та розсіяної радіацій:

$$Q = S' + D, \tag{5.2}$$

де S' – пряма радіація;

D – розсіяна радіація.

Фотосинтетично активна радіація (ФАР) визначається по співвідношенню:

$$Q_Ф = 0{,}42S' + 0{,}6D, \tag{5.3}$$

де $Q_Ф$ – фотосинтетично активна радіація (ФАР).

Радіаційний баланс для елементарного шару РП Δz визначається за формулою:

$$R_б(z) = \sum_0^z \Delta R, \tag{5.4}$$

де z – вертикальна координата.

Водний режим посіву

Водний баланс шару ґрунту, де мешкає коріння, складається з характеристик сумарного випарування, балансу вологи обміну між зоною аерації і зоною ґрунтових вод, балансу вологи стоку по поверхні ґрунту, величини запасу доступної рослині вологи в ґрунті, а також надходження вологи з опадами та при поливі:

$$E + \Phi_г + \Phi_{ст} = \Delta w + J + m, \qquad (5.5)$$

де E – сумарне випарування;

$\Phi_г$ – баланс вологи при обміні між зоною аерації і зоною ґрунтових вод;

$\Phi_{ст}$ – баланс вологи стоку по поверхні ґрунту;

Δw – запас доступної рослині вологи в ґрунті;

J – надходження вологи з опадами;

m – надходження вологи при поливі.

Потік сумарного випарування визначається в залежності від інтегрального коефіцієнта турбулентного обміну в атмосфері та градієнта парціального тиску водяної пари в повітрі:

$$E \approx ak \frac{\Delta q_a}{\Delta z}\Big|_{z>H}, \qquad (5.6)$$

де a - щільність повітря;

k - інтегральний коефіцієнт турбулентного обміну в атмосфері;

q_a – парціальний тиск водяної пари в повітрі;

H – висота рослин.

Транспірація рослин знаходиться як функція числа Рейнольдса, щільності рослинного покриву і температури листя:

$$E_l = f(Re, s, T_l) \big/_{0<z<H}, \qquad (5.7)$$

де E_l – транспірація рослин;

Re–число Рейнольдса;

s – щільність рослинного покриву;

T_l – температура листя.

Щільність потоку вологи в рідкій фазі в ґрунті і рослині визначається коефіцієнтом вологопровідності ґрунту та градієнтом потенціалу вологи в ґрунті:

$$j_w \approx a_w k_s \frac{\Delta p^*}{\Delta z}\Big|_{z<0}, \qquad (5.8)$$

де j_w – потік вологи в рідкій фазі в ґрунті і рослині;

a_w - щільність води;

k_s – коефіцієнт вологопровідності ґрунту;

p^* – потенціал вологи в ґрунті.

Надходження вологи з опадами залежить від їхньої інтенсивності і тривалості випадання:

$$J = \int I_0 dt, \qquad (5.9)$$

де J – надходження вологи з опадами;

I_0 – інтенсивність випадання опадів; t – час.

Стік вологи по поверхні ґрунту є функцією інтенсивності випадання опадів та коефіцієнта використання опадів

$$\Phi_{ст} = f(I_0, k_{ос}), \qquad (5.10)$$

де $k_{ос}$ – коефіцієнт використання опадів.

Остання характеристика – коефіцієнт використання опадів - знаходиться в залежності від кількості вологи, що надійшла з опадами, сумарного випарування, балансу вологи при обміні між зоною аерації і зоною ґрунтових вод, а також запасу доступної рослині вологи в ґрунті:

$$k_{ос} \approx \frac{J - E - \Phi_г - \Delta w}{J}. \qquad (5.11)$$

Сумарне випарування розглядається як сума величин випарування вологи ґрунтом і транспірацією рослин:

$$E = E_l + E_s. \qquad (5.12)$$

Тепловий режим посіву

Рівняння теплового балансу рослинного покриву включає турбулентний потік тепла в повітря, потік тепла в ґрунт, а також витрати тепла на сумарне випарування:

$$R_б = P_{ta} + B + LE, \qquad (5.13)$$

де P_{ta} – турбулентний потік тепла в повітря;

B – потік тепла в ґрунт;

L – питома теплота пароутворення.

Турбулентний потік тепла в повітря прямо пропорційний інтегральному коефіцієнту турбулентного обміну в атмосфері та градієнту температури повітря в рослинному покриві:

$$P_{ta} \approx ak \frac{\Delta T_a}{\Delta z}\Big|_{z>H}, \qquad (5.14)$$

де T_a – температура повітря.

Турбулентний потік тепла від листка прямо пропорційний коефіцієнту турбулентного обміну для листка і різниці температури листків і температури повітря:

$$P_{tl} \approx D_T (T_l - T_a)\big|_{0<z<H}, \qquad (5.15)$$

де P_{tl} – турбулентний потік тепла від листка;

D_T – коефіцієнт турбулентного обміну для листа:

T_l – температура листя.

Потік тепла в ґрунт визначається величинами теплопровідності ґрунту і градієнтом температури ґрунту:

$$B \approx -\lambda_s \frac{\Delta T_s}{\Delta z}\Big|_{z<0}, \qquad (5.16)$$

де λ_s – теплопровідність ґрунту;

T_s – температура ґрунту.

Газовий режим посіву

Баланс CO_2 у рослинному покриві складається з потоку CO_2 до рослин з повітря, потоку CO_2 до рослин із ґрунту і потоків CO_2 при диханні листя і коріння:

$$A_o = \Phi_a + \Phi_s - \Phi_l - \Phi_r, \qquad (5.17)$$

де A_o – асиміляція CO_2 рослинним покривом;

Φ_a – потік CO_2 до рослин з повітря;

Φ – потік CO_2 до рослин із ґрунту;

Φ_l , Φ_r – потік CO_2 при диханні листка і кореня.

Потік CO_2 до рослин з повітря прямо пропорційний інтегральному коефіцієнту турбулентного обміну в атмосфері і градієнту концентрація CO_2 у повітрі:

$$\Phi_a \approx ak\frac{\Delta C_a}{\Delta z}\Big|_{z>H}, \qquad (5.18)$$

де C_a – концентрація CO_2 у повітрі.

Потік CO_2 до рослин із ґрунту пропорційний коефіцієнту дифузії CO_2 у ґрунті і градієнту концентрації CO_2 у ґрунті:

$$\Phi_s \approx a' D_r \frac{\Delta C_s}{\Delta z}\Big|_{z<0}, \qquad (5.19)$$

де D_r – коефіцієнт дифузії CO_2 у ґрунті:

C_s – концентрація CO_2 у ґрунті.

Потік CO_2 при диханні листя залежить від інтенсивності фотосинтетично активної радіації, концентрації CO_2 у повітрі і температури листя:

$$\Phi_l \approx f(Q_\Phi, C_a, T_l)\big|_{0<z<H}. \qquad (5.20)$$

Потік CO_2 при диханні коренів залежить від концентрації CO_2 у ґрунті, біологічної активності ґрунту і температури ґрунту:

$$\Phi_r \approx f(C_s, \beta, T_s)\big|_{z<0}, \qquad (5.21)$$

де β – біологічна активність ґрунту.

Коефіцієнт дифузії CO_2 у ґрунті залежить від активної пористості ґрунту і температури ґрунту:

$$D_r \approx f(\Pi_s, T_s), \qquad (5.22)$$

де Π_s – активна пористість ґрунту.

Вітровий режим посіву

Інтегральний коефіцієнт турбулентного обміну в атмосфері є функцією висоти рослинного покриву і критеріїв подібності Річардсона і Грасгофа:

$$k = f(z, Ri, Gr)\big|_{z>H}, \qquad (5.23)$$

де k – інтегральний коефіцієнт турбулентного обміну в атмосфері;

Ri, Gr – критерії подібності Річардсона, Грасгофа.

Коефіцієнт турбулентного обміну для листка є функцією висоти

рослинного покриву і критеріїв Re, Gr – критеріїв подібності Рейнольдса і Грасгофа:

$$D_T \approx f(z, \mathrm{Re}, Gr)\big|_{0<z<H}, \qquad (5.24)$$

де D_T – коефіцієнт турбулентного обміну для листка;

Re, Gr – критерії подібності Рейнольдса, Грасгофа.

Розвиток рослин у посіві

Баланс зеленої маси рослин визначається за допомогою величини щільності рослинного покриву по висоті рослин:

$$B_l \approx \sum_0^H s\Delta z\big|_{0<z<H}, \qquad (5.25)$$

де B_l – зелена маса рослин;

s – щільність рослинного покриву;

H – висота рослин.

Баланс маси коренів рослин визначається за допомогою величини щільності коренів рослин по глибині розповсюдження коренів:

$$B_r \approx \sum_0^r \omega\Delta z\big|_{0<z<r}, \qquad (5.26)$$

де B_r – маса коренів рослин;

ω – щільність коренів рослин;

r – глибина розповсюдження коренів.

Відносна площа листя (листковий індекс) визначається як відношення площі листя однієї рослини до площі ґрунту на одну рослину:

$$L_0 = \varphi_l / \varphi_s, \qquad (5.27)$$

де L_0 – листковий індекс;

φ_l – площа листя однієї рослини;

φ_s — площа ґрунту на одну рослину.

Характерний розмір листка знаходиться по величині площі листя однієї рослини і кількості листків на одній рослині:

$$l = \sqrt{\varphi_l / N}, \qquad (5.28)$$

де l – характерний розмір листка;

N – кількість листків на одній рослині.

Режим мінерального живлення посіву

Споживання рослиною елементів мінерального живлення знаходиться як баланс вмісту елементів мінерального живлення в ґрунті, кількості внесених добрив і балансу при обміні елементами мінерального живлення між зоною аерації і зоною ґрунтових вод:

$$П = C_п + Ф_{пв} - Ф_{пг}, \tag{5.29}$$

де $П$ – споживання рослиною елементів мінерального живлення;

$C_п$ – концентрація елемента мінерального живлення;

$Ф_{пв}$ – кількість внесених добрив;

$Ф_{пг}$ – баланс при обміні елементами мінерального живлення між зоною аерації і зоною ґрунтових вод.

Потік елемента мінерального живлення прямо пропорційний коефіцієнту дифузії елемента мінерального живлення і градієнту концентрації елемента мінерального живлення в зоні аерації:

$$j_п \approx aD_п \frac{\Delta C_п}{\Delta z}\Big|_{z<0}, \tag{5.30}$$

де $j_п$ - потік елемента мінерального живлення;

$D_п$ – коефіцієнт дифузії елемента мінерального живлення.

Коефіцієнт дифузії елемента мінерального живлення знаходиться як функція величин потенціалу вологи в ґрунті та температури ґрунту:

$$D_п \approx f(p^*, T_s), \tag{5.31}$$

де p^* – потенціал вологи в ґрунті.

З приведених вище даних видно, що окремі складові радіаційного балансу використовуються як у дослідженнях теплового балансу, так і в дослідженнях розвитку рослин у посіві. Параметри турбулентного обміну в приземному шарі атмосфери, що можуть бути отримані при обробці даних про вітровий режим посіву, використовуються в розрахунках параметрів водного, теплового і газового режимів.

Об'єктом вимірів у ході досліджень є збурювання в тих чи інших фізичних полях метеорологічних елементів і характеристик РП, які можна розглядати як деякі окремі утворення, помітні в просторі і в часі. Система рівнянь (5.1)-(5.31) дає можливість кількісно оцінити основні характеристики таких збурювань стосовно до розподілів параметрів,

представлених у вигляді графіків на рис. 5.2-5.8.

З позицій характеристик збурювання, об'єкт польового експерименту можна охарактеризувати наступними показниками:

– геометричними параметрами об'єкта досдідження, $l_{об}$ (лінійний розмір ділянки, площа дослідження чи просторовий крок зміни параметра);

– тривалістю існування збурювання $\tau_{об}$ (крок за часом, характеристика мінливості процесу і т.п.);

– параметром інтенсивності $f_{об}$ (розмір збурювання в досліджуваній властивості, чутливість до зміни параметра).

У свою чергу технічні засоби одержання інформації або модель досліджуваного процесу можуть бути охарактеризовані системою аналогічних показників: вирішувальна здібність у просторі l_p і в часі τ_p , а також вирішувальною здібністю по визначаємому параметрі (по інтенсивності) f_p.

Зіставлення характеристик об'єкта і засобів одержання інформації або об'єкта і моделі дає можливість кількісних оцінок репрезентативності та відповідності. Для цієї мети зручно використовувати відносні безрозмірні параметри $L = l_{об} / l_p$; $T = \tau_{об} / \tau_p$; $F = f_{об} / f_p$. Їхні значення можуть змінюватися в межах від нуля до нескінченності і у більшості випадків немає фізичних передумов для обмеження діапазону цих змін.

Для більш детального аналізу цей діапазон зручно розбити на три робочі зони, які можна розглядати на прикладі параметра геометричної відповідності L. Перша зона $L<1$ відповідає умовам, коли розміри об'єкта менше вирішальної здібності вимірника (чи моделі). За цієї умови об'єкт не може бути виявлений і описаний, він губиться в полі зору. Друга зона вимагає виконання умови $1 \le L \le 2$. При цьому спостерігається повна відповідність об'єкта і вимірника: об'єкт фіксується як одна точка і отримана інформація не вимагає додаткової обробки для ідентифікації об'єкта. Для третьої зони при умові $L>2$ об'єкт можна охарактеризувати за розмірами і формою як групу точок. При цьому в тих випадках, коли при $L \ge 2$ нам необхідно описати об'єкт у цілому, початкова інформація підлягає додатковій обробці (осереднення, визначення екстремумів і т.п.).

Параметри відповідності за часом T і по інтенсивності F підлягають аналогічному аналізу і для них можуть бути виявлені такі ж зони характеристик, які мають такі ж властивості що і параметри геометричної відповідності L.

Найбільш проста оцінка значень параметра $l_{об}$ – це просто геометричні розміри досліджуваних об'єктів. Що стосується вирішальної здатності засобів вимірювання l_p, то для визначення цього показника необхідна інформація про формування полів фізичних характеристик та

інформація про властивості засобів вимірювання. У деяких випадках значення l_p обумовлене розмірами чутливих елементів (температура органів рослин), в інших – мінливістю параметрів (температура та вологість ґрунту) або особливостями формування процесів обміну в приземному шарі повітря (температура повітря над рослинами).

Для параметрів росту і розвитку рослин, до яких відносяться такі характеристики, як основні фітометричні показники, маса рослин, інтенсивність фотосинтезу та ін., оцінки τ_p більш складні, чим для мікрокліматичних показників.

У всіх варіантах польових дослідів параметри цієї групи можна визначати тільки шляхом відбирання проб з наступною статистичною обробкою отриманого матеріалу, тому що всі методи індивідуальних вимірювань на окремій рослині недостатньо репрезентативні. Для надійного визначення параметрів росту і розвитку рослин необхідні досить великі терміни (до декількох діб). Оскільки τ_p самовільно змінювати неможливо, варто мати на увазі, що для цієї групи параметрів вимірювання репрезентативні тільки для інтервалу 5-10 діб.

5.1.2 Структура інформаційних потоків експериментального полігона

Рішення складних задач вивчення мікрометеорологічного режиму РП та ідентифікації моделей, розробка методик їхнього застосування можливо тільки в рамках комплексних експериментальних полігонів, оснащених усіма необхідними технічними засобами одержання інформації та постановки модельних експериментів. Достатня повнота інформації буде забезпечуватися лише при правильному поєднанні різних експериментів при використанні модельних дослідженьв у спеціальних спорудженнях експериментального полігона. Необхідний набір даних може бути отриманий при проведенні наступних типів експериментів:

– вегетаційні модельні експерименти в стандартних посудинах або малогабаритних лізиметрах, розташованих у спеціальних кліматичних камерах чи культиваційних спорудженнях закритого ґрунту з повністю контрольованими умовами вирощування рослин;

– модельні експерименти в спеціальних спорудженнях (лізиметрах, засушниках і т.п.) з частково контрольованими та регульованими умовами переважно водного режиму і режиму мінерального живлення;

– дрібноділяночні багатофакторні польові експерименти з частково контрольованими умовами та регулюванням окремих факторів життєдіяльності вирощуємих культур;

– середньо- чи великоділяночні експерименти в напіввиробничих

умовах з контролем елементів основних балансових співвідношень та факторів життєдіяльності рослин;

– виробничі польові експерименти з контролем узагальнених грунтово -біокліматичних показників і основних параметрів формування врожаю.

Питання збору інформації на експериментальних полігонах будуть розглянуті нами далі на прикладі полігона, призначеного для проведення всього зазначеного комплексу експериментів, коли обсяги інформації будуть максимальними. Метою організації широкого кола досліджень на полігоні такого типу є:

– проведення фундаментальних досліджень переносу енергії та речовини в системі "грунт - рослина - атмосфера";

– одержання комплексу експериментальних даних, необхідних для побудови, апробації та уточнювання системи моделей родючості поля, продуктивності посіву та формування врожаю;

– накопичення матеріалів грунтово-біокліматичних показників, що використовуються при програмуванні врожаїв і керуванні технологічними процесами в землеробстві та рослинництві для регіону, зони, господарства і поля; оцінка мінливості цих показників та статистичних характеристик, необхідних для прогнозу і визначення репрезентативних значень показників;

– розробка методів і прийомів технологічної реалізації оптимальних режимів оброблення польових культур при керуванні основними факторами формування врожаю.

Схема збору і збереження інформації для комплексного експериментального полігона приведена на рис. 5.9. На полігоні знаходяться три рівнобіжні системи збору інформації: централізована інформаційно-вимірювальна система (ІВС), локальні ІВС пересувних польових лабораторій та спеціальних споруджень і системи ручного неавтоматизованого збору даних. Незалежно від групи обєктів полігона, забезпечених інформаційною системою, централізоване збирання даних організується для параметрів, репрезентативних у межах досить великих площ (господарство в цілому, група полів та ін.) і широко використовуємих у межах експериментального полігона або господарства. Для тих характеристик, що повинні вимірятися один раз у добу і рідше, лабораторії проводять неавтоматизований збір даних, поза рамками системи централізованого збору.

Локальні автоматизовані системи пересувних польових лабораторій використовуються при збиранні інформації про параметри, які репрезентативні для відносно невеликих ділянок, а також у тих випадках, коли потреба у вимірюваннях обмежується інтервалом часу 2-4 доби. Пересувні польові лабораторії спеціалізовані і забезпечують одержання

комплексної інформації. З цією метою в програму їхньої роботи включаються як автоматичні вимірювання, так і більш складні неавтоматичні вимірювання, що вимагають участі лабораторного персоналу й обробки проб і зразків. Програмою роботи пересувних польових лабораторій передбачається не тільки збирання даних, але і їх первинна обробка з концентрацією інформації і виведенням її на проміжний носій, що забезпечує надалі автоматичне введення отриманих даних для обробки на ПЕОМ. Локальні ІВС спеціалізованих споруджень полігона використовуються в модельних експериментах (лізиметри, засушник, стокові площадки і т.п.).

Система ручного неавтоматизованого збору даних охоплює групу мало мінливих параметрів, вимірювання яких здійснюються з інтервалом 1-10 доби і більше (наприклад, вимірювання за вегетаційний сезон), а також такі показники, що визначаються в ході обробки зразків (вміст елементів мінерального живлення, деякі фітометричні та біофізичні показники і т.п.).

Зазначені особливості збору даних відбиті в інформаційних потоках експериментального полігона (див. рис. 5.9). Інформація неавтоматизованих вимірів концентрується в лабораторії і потім передається в центр обробки і збереження даних, безпосередньо туди ж на проміжному носії надходить інформація польових пересувних лабораторій (контроль і експертну оцінку інформації здійснює персонал лабораторій).

Основними джерелами інформації експериментальних об'єктів полігона являються:

– модельні експерименти, куди входять експерименти в спеціальних спорудженнях (лізиметри та ін.), вегетаційні експерименти в посудинах, кліматичних камерах і культиваційних спорудженнях (камерних і інших теплицях);

– факторні експерименти, що охоплюють усі дрібноділяночні експерименти;

– стаціонарний балансовий експеримент, що організовується у сівозміні і є середньо- чи великоділяночним напіввиробничим польовим експериментом із застосуванням сільськогосподарської техніки і технології, максимально наближеним до умов господарства;

– виробничий експеримент, що реалізується безпосередньо на полях господарства і не пов'язаний з великими обсягами вимірювань і досліджень. На цих ділянках організовуються тільки спеціальні епізодичні спостереження (не більш 2-3 разів за сезон).

Загальна інформація про фактори життєдіяльності рослин, яка необхідна для проведення виробничого експерименту, надходить від датчиків метеорологічних параметрів, установлених на метеорологічній площадці.

Загальна схема експериментального полігона представлена на рис. 5.10. Відповідно до прийнятої структури полігон включає наступні основні об'єкти:

– комплект експериментальних вегетаційних кліматичних камер і експериментальних теплиць *(ЕТ)* та виробничих теплиць *(ВТ)* для більш великомасштабних експериментів;

– комплекс засушника *(КЗ),* лізиметрів для досліджень режимів водного *(Л1)* і мінерального живлення *(Л2)*;

– поле стаціонарного великоділяночного багаторічного балансового експерименту *(ЕП1)* і поле дрібноділяночного багатофакторного експерименту *(ЕП2);*

– групу полів для виробничих польових експериментів *(ПЕ1-ПЕ3)*

Крім того, до складу полігона входять допоміжні об'єкти: метеорологічний пост *(МП),* машинно-тракторний парк *(МТП),* сховище сільськогосподарської продукції *(СП),* а також інші підрозділи, необхідні для нормальної господарської діяльності, зокрема центральна диспетчерська служба *(ЦДС)* і лабораторно-адміністративний комплекс *(ЛАК).*

Керуючий обчислювальний комплекс *(КОК)* виконує функції автоматизованої системи керування технологічними процесами і забезпечує рішення задач централізованого збору даних про агрометеорологічні, агротехнічні та фізіологічні параметри посівів на експериментальних полях і ділянках полігона. Інформація від польових лабораторій *(ПЛ)* також надходить в *КОК.* Технічні засоби *КОК* забезпечують первинну обробку отриманої інформації, накопичення матеріалів досліджень і їхню підготовку до видачі на вищу ступінь обробки і керування (безпосередньо по каналах зв'язку чи на проміжному носії). Крім перерахованих функцій, на *КОК* можуть бути покладені задачі розробки технологічних рекомендацій і контроль за їх виконанням у межах експериментальних полів полігона, а також контроль за роботою локальних систем автоматичного керування, що можуть використовуватися на окремих об'єктах полігона.

До локальних систем автоматичного керування відносяться:

– автоматика керування мікрокліматом теплиць, культиваційних споруджень і вегетаційних установок;

– автоматичні пристрої керування засушником і окремими лізиметрами;

– комлекси автоматизованого керування поливом для окремих полів чи ділянок полігона.

Польові дослідження, що проводяться на експериментальному полігоні, будуються на балансовій основі, тобто здійснюється фіксація складових балансових співвідношень. Крім цього визначаються основні

параметри ґрунту.

В основу програми спостережень може бути покладено наступний перелік обумовлених параметрів:

1. Складові водного балансу: надходження вологи за рахунок опадів і при поливі; сумарне випарування вологи; винесення вологи з зони аерації за рахунок ґрунтової інфільтрації; винесення вологи з балансової ділянки за рахунок поверхневого стоку; вологозапаси шару рунту, де розповсюджена коренева система. Вимірювання цієї групи параметрів проводяться на полях, метеорологічній площадці, лізиметрах та на спеціальних стокових площадках.

2. Складові енергетичного балансу: радіаційний баланс діяльної поверхні; тепловий потік у ґрунт; сумарне випарування поля; турбулентний потік тепла над полем; профіль коефіцієнта турбулентного обміну в рослинному покриві і над ним; транспірація та фізичне випарування із ґрунту. Вимірювання цієї групи параметрів реалізуються в основному за допомогою переміщаємої польової теплобалансової лабораторії. Датчики вимірювальної апаратури встановлюються на полях досить великих розмірів (не менш 1-2 га).

3. Загальні характеристики метеорологічної обстановки: профілі температури і вологості повітря; температури ґрунту; швидкості вітру; тривалість сонячного сяйва; пряма, розсіяна і сумарна сонячна радіація; характеристики хмарності. Вимірювання проводяться на метеорологічній площадці.

4. Складові балансу елементів мінерального живлення: фонова концентрація основних елементів мінерального живлення; характеристики внесених добрив і доступності мінеральних елементів у складі добрив; винесення елементів мінерального живлення в органи рослин; винесення мінеральних речовин із зони кореневого живлення (водяним потоком інфільтрації і поверхневого стоку). Вимірювання здійснюються агрохімічною лабораторією на ґрунтових зразках і рослинних пробах, відібраних безпосередньо на експериментальних ділянках і полях, на пробах використовуваних добрив, а також на пробах води, що відібрані у ході визначення складових водного балансу.

5. Характеристики рослинного покриву для оцінки балансу накопичення і витрати органічних речовин у полі: інтенсивність фотосинтезу (по поглинанню CO_2 і швидкості накопичення вегетативної маси); основні фенологічні характеристики; основні фітометричні характеристики і показники органогенезу: густота стояння рослин, висота рослин, площа листя, вегетативна і суха маса органів рослин, розподіл органів рослин і зеленої маси по висоті та ін. Визначення перерахованих характеристик проводиться на факторних і модельних експериментах, а також (по скороченій програмі) на багаторічному балансовому

експерименті. Вимірювання інтенсивності фотосинтезу по динаміці CO_2 проводиться градієнтним методом на тих же полях, на яких проводяться вимірювання елементів теплового балансу. На діляночних і модельних експериментах фотосинтез по CO_2 може визначатися з застосуванням польової переміщуваної фітокамери на основі спеціальної методики вимірювання. Наближені оцінки параметрів поглинання CO_2 рослинами можуть проводитися листковими камерами.

5.1.3 Система технічних засобів одержання інформації на експериментальному полігоні

Практичне використання результатів експериментів обумовлює необхідність одержання інформації з різними рівнями просторової репрезентативності.

Потреби вимірювання в основному забезпечуються приладами для визначення агрометеорологічних характеристик приземного шару повітря, створеними в Агрофізичному інституті (АФІ), а також комплексом приладів для визначення фізіологічних характеристик рослини В. Г. Карманова. У тому числі різні типи електротермометрів, вимірників вологості повітря плівкового і псіхрометричного типів, вимірники швидкості вітру, радіаційний балансомір, ґрунтовий тепломір та ін. Для вимірювання комплексних параметрів на рослині (асиміляції CO_2, транспірації і т.п.) використовуються різні типи листкових камер у поєднанні з газоаналізаторами. За допомогою цих засобів вимірювання можна одержати інформацію про розподіл основних параметрів у середині рослинного покриву, який ефективно використовується в моделях продуктивності рослин.

Прилади для вимірювання основних метеорологічних параметрів, розроблені в АФІ, за своїми характеристиками (діапазони вимірів, точність і т.п.), як правило, відповідають стандартній апаратурі, що використовується на мережі станцій і постів Гідрометеорологічної служби.

До характерних особливостей датчиків і приладів, створених в АФІ для оцінки метеорологічної обстановки на полі, відносяться: дистанційність вимірів (відстань від датчика до вимірника 500-700 м), слабка залежність вимірів від характеристик кабельних ліній у полі, можливість реєстрації результатів вимірів на автоматичних стандартних електронних потенціометрах чи інших реєстраторах.

Вибір технічних засобів одержання інформації визначається конкретними задачами досліджень.

Властиві даній культурі та умовам експерименту розподіл метеорологічних величин у приземному шарі повітря спостерігаються тільки при досить великих розмірах експерименттальних полів. Якщо

лінійні розміри ділянки експерименту менше 150-200 м, мікрокліматичні умови на ній будуть залежати як від умов експерименту, так і від умов на суміжних експериментальних ділянках (це необхідно враховувати при екстраполяції результатів досліджень). Зазначені міркування особливо істотні при визначенні складових теплового і водного балансів за характеристиками приземного повітря.

Для вимірів комплексних показників поля (ділянки) використовуються спеціальна апаратура і методики. Для малої ділянки і для поля вони повинні бути різними. Апаратура і методики, які застосовуються для вимірювання складових теплового і водного балансів, засновані, як правило, на використанні особливостей турбулентної дифузії, що обумовлює перенесення енергії, водяної пари і вуглекислого газу в приземному шарі атмосфери. Передбачається, що коефіцієнт турбулентного обміну k є універсальним параметром, який характеризує інтегральний перенос будь-якої пасивної субстанції на середній висоті розміщення датчиків. Турбулентний потік тепла, сумарне випарування, потік вуглекислого газу в приземному шарі повітря визначаються по градієнтах концентрацій відповідних елементів і за значенням коефіцієнта обміну. Останній може бути визначений по профілях вітру чи із співвідношень розрахункової схеми методу теплового балансу (розрахункові співвідношення методу турбулентної дифузії у самій загальній формі представлені формулами (5.1) – (5.31).

Основне рівняння балансу формулює власне кажучи закон збереження енергії, справедливий для середніх значень параметрів за досить великі інтервали часу.

Рівняння балансу придатні для досить великих площадок з однорідним рослинним покривом, на яких можна нехтувати горизонтальним переносом енергії вітровим потоком повітря. Необхідні умови однорідності метеорологічних характеристик приземного шару можуть бути забезпечені на площадках не менш 1–4 га.

При дослідженнях теплового балансу в польових умовах можна використовувати стандартну апаратуру метеорологічних станцій (психрометри, ґрунтові термометри, балансоміри та ін.). За проведеними оцінками погрішність визначення середніх годинних значень складових теплового балансу в середньому складає 20–30 %.

Апаратура для досліджень теплового балансу, що створена в АФІ, забезпечує автоматизацію вимірів і реєстрації необхідних параметрів, а в деяких моделях пристроїв також і автоматичне обчислення складових балансу за рівняннями. Комплект цієї апаратури включає:

– комплект датчиків теплового балансу, що забезпечує вимірювання і реєстрацію автоматичним самописним потенціометром усіх вихідних даних;

– теплобалансограф, що має у своєму складі крім комплекту датчиків спеціалізований електромеханічний обчислювальний пристрій, який здійснює розрахунок усіх складових балансу і їхніх сум за обраний інтервал часу;

– комплект пульсаційної апаратури, що забезпечує визначення складових теплового балансу і характеристик турбулентності приземного шару повітря на основі вимірювання пульсацій температури і вологості повітря, вертикальної складової швидкості руху повітря.

При проведенні польових експериментів на відносно малих ділянках, для яких неможливо репрезентативне використання звичайної методики й апаратури для теплобалансових вимірів, визначення транспірації та інших складових теплового балансу можливо з застосуванням переміщуваної польової камери, схема якої зображена на рис. 5.11. Реалізуються два варіанти подібної камери.

У першому випадку герметизована камера встановлюється на поверхню експериментальної ділянки на дуже короткий інтервал часу (не більш 10–20 хв). Після завершення вимірів камера піднімається вище рівня рослин, що у паузі між вимірами розвиваються в природних польових умовах. Ділянка, займана камерою (1) відносно невелика (близько 0,2-0,5 $м^2$), але достатня для того, щоб при вимірах одержати характеристики, що відповідають осередненим параметрам для групи рослин. Природно, при цьому нівелюються індивідуальні особливості рослин на ділянці під укриттям. Спеціальний вентилятор (2) здійснює прокачування повітря через камеру: забір повітря проводиться над рослинним покривом, видалення повітря з камери через вихлопний клапан (3). Датчики, що входять до складу апаратури, дозволяють проводити вимірювання витрати повітря (4), перепадів температури і вологості повітря (5, 6), а також перепаду концентрації CO_2 між входом і виходом камери (7). Для вимірів і регулювання режиму камери використовується досить складна апаратура, що встановлюється в польовій лабораторії (11). У полі біля камери міститься робочий комутатор ($Р_к$), що здійснює зв'язок датчиків з вимірювальною апаратурою.

Вимірювані параметри дають можливість розрахувати такі показники як сумарне випарування (транспірацію) і асиміляцію CO_2 групою рослин, що знаходиться в камері, а також оцінити інші складові теплового балансу. Через те, що камера закриває рослини на невеликий проміжок часу, вони не встигають істотно перегрітися і обумовлені параметри досить близькі до їхніх значень в умовах відкритої площадки.

Другий варіант передбачає установку камери на більш тривалий термін (до 2-3 доби) і часткове кондиціонування повітря. При цьому камера працює в режимі надлишкового тиску за рахунок подачі зовнішнього повітря в робочий об'єм за допомогою насоса. Проводяться

вимірювання витрати повітря в трубопроводі подачі його в камеру, а також перепадів концентрації між входом і виходом камери (по CO_2 і парою води) і розрахунки випарування й асиміляції. При реалізації такої методики площа камери може досягати 4-5 $м^2$, а висота – 1,5-2 м. Повітря в камеру подається через систему труб-розподільників, що дають можливість додаткового регулювання теплового режиму рослин у камері. Найкраще наближення до умов природного травостою дає розміщення розподільних повітроводів усередині рослинного покриву, особливо в його верхній частині, тому що в цьому шарі здійснюються всі основні процеси трансформації енергії – прихід сонячної радіації, теплообмін з повітряним потоком, що надходить з вище розташованих шарів повітря та ін.

Для культур суцільної сівби з високою щільністю розміщення рослин можливе використання малих камер, а у випадку досліджень на просапних культурах задовільні результати можуть бути отримані тільки при застосуванні великої камери, яка дозволяє осереднювати параметри із групи 15–20 рослин.

Регулювання і контроль режиму в камері може виконуватися по температурі повітря або листя (8, 9, 10). При рівності температури листя чи повітря усередині і поза камерою можна вважати, що тепловий баланс рослинного покриву в цих умовах однаковий, а значення сумарного випарування і турбулентного потоку тепла усередині камери дорівнюють значенням цих параметрів і поза нею. Більш точна відповідність балансів може спостерігатися в тих випадках, коли вдається змоделювати в камері природний профіль вітру в травостої.

Використання переміщуваної камери для досліджень енергетичного балансу й обміну вуглекислотою не вносить порушень у розвиток рослин, оскільки методика вимірів передбачає установку камери на експериментальній ділянці на 1–2 доби і проведення серій вимірів не частіше чим один раз у 2-3 тижні.

Крім згаданих методик і технічних засобів, для одержання інформації про складові теплового і водного балансу, можуть бути використані також і деякі модельні експерименти в спеціальних спорудженнях експериментального полігона. Так, зокрема, для одержання інформації про значення сумарного випарування можуть використовуватися модельні експерименти в лізиметрах або ґрунтових випарниках. Наближені оцінки випарування реалізуються в експериментах на комплексі засушника, у ході яких здійснюється не тільки контроль, але і двостороннє керування водним балансом факторного дрібноділяночного експерименту.

Комплекс засушника являє собою ділянка дрібноділяночного експерименту, обладнаний системою поливу ділянок і легким укриттям,

яке встановлюється на ділянці в період випадання природних опадів. Після припинення опадів укриття засушника знімається і розвиток рослин відбувається в природних умовах, за винятком водного режиму, що залежить від режиму поливу, заданого для кожної ділянки. Для розміщення засушника вибирається ділянка, на якій виключається вплив стоку і ґрунтових вод на умови вирощування рослин. Використання засушника дозволяє вести експерименти з великим динамічним діапазоном водного режиму незалежно від природної регіональної вологозабезпеченості полігона. Застосування засушника прискорює проведення таких експериментів і дозволяє моделювати екстремальні метеорологічні умови з дефіцитом вологозабезпеченості.

У рамках експериментального полігона більш точні дослідження водного режиму і водного балансу здійснюються на моделях, у яких використовуються лізиметри різних розмірів і конструкцій.

Лізиметричний комплекс оснащується 10–20 лізиметрами з фіксованим рівнем ґрунтових вод, групою спеціальних лізиметрів і гідравлічних випарників, а також групою з 50–70 ізольованих лізиметричних блоків для контролю режиму мінерального живлення. Прилади керування окремих лізиметричних установок, реєстратори режиму, кабелі датчиків, які встановлені у ґрунтових блоках лізиметрів виведені в підземний бункер. Розміри ґрунтових блоків лізиметрів (площа і глибина) так само, як і фіксований рівень ґрунтових вод у експерименті, визначаються особливостями досліджуваних культур і загальних цілями модельних експериментів.

5.2 Комплексний біолого-агрометеорологічний експеримент по вивченню впливу гідрометеорологічних факторів на продуктивність просапних культур (на прикладі кукурудзи)

5.2.1. Загальні вимоги до проведення комплексного біолого-агрометеорологічного експерименту

Метою комплексного біолого-агрометеорологічного експерименту (КБАЕ) згідно робіт М.І. Гойси, Р.М. Олійника, А.Д.Рогаченко є одержання комплексу зведень про стан рослин, їх фотосинтетичної продуктивності та стану факторів життєдіяльності. При організації спостережень за продуктивністю керуються наступними положеннями: обрані показники продуктивності повинні по можливості однозначно залежати від параметрів, що характеризують фактори життєдіяльності; визначення цих показників і факторів життєдіяльності повинне бути сполучене в просторі і часі; значення показників продуктивності й інших характеристик агрофітоценозу повинні надійно осереднятися у просторі.

При виборі параметрів, що характеризують фактори життєдіяльності, виходять з таких вимог: кожен фактор повинен визначатися одним параметром; обраний параметр повинен дозволяти елімінувати отримані залежності від конкретних географічних умов для того, щоб залежності мали можливо, більший ареал застосування; кожен параметр повинен просто і надійно вимірюватися, при цьому необхідно враховувати можливості його зв'язку з прогнозованими параметрами, які характеризують той же фактор.

У зв'язку з викладеним вище КБАЕ включає: проведення спостережень за станом рослин і посіву в цілому; за станом зовнішнього середовища та оцінку агротехнічних і меліоративних заходів.

Спостереження за станом рослин включають фенологічні та фітометричні спостереження, а також вимірювання інтенсивності фотосинтезу листя кукурудзи, ступеня відкриття устячок і водного дефіциту листя.

Спостереження за станом зовнішнього середовища включають повний комплекс актинометричних, фітокліматичних, тепло- і воднобалансових спостережень над посівом, у посіві і під посівом; вміст CO_2 у посіві визначається при вимірюваннях фотосинтезу.

Розглянемо організацію і проведення КБАЕ на конкретному прикладі.

Експериментальні польові дослідження з описаної системи проводилися з 1964 по 1977 р. Найбільш повний комплекс даних отриманий у 1964–1967 р. на виробничих посівах зрошуваної і незрошуваної кукурудзи зернорадгоспу ім. Т. Г. Шевченко Миколаївської області. Об'єктом досліджень були посіви гібридів ВІР 156 і ВІР 42 в трьох варіантах експерименту: у 1964 і 1965 р. були поля, зрошувані дощуванням площею 10 га і по борознах 10 га, і незрошуване поле 152 га; у 1966 і 1967 рр – незрошуване поле 158 га і два поля з різним режимом зрошення дощуванням: одне поле 35 га поливалося 5 разів малими нормами, а друге 35 га – 3 рази великими нормами. Контролем служили матеріали аналогічних синхронних теплобалансових і радіаційних спостережень на метеорологічній площадці, що була розташована на цілині на відстані 2–3 км від полів.

Експериментальні ділянки розміром 100×100 м^2 виділялися в центрі виробничих посівів кукурудзи на відстані не менш 200 м від краю поля. На них розміщалися площадки для проведення градієнтних, актинометричних і водно-балансових спостережень.

5.2.2. Спостереження за станом рослин

Фітометричні спостереження. Метою фітометричних спостережень є одержання даних про динаміку елементів продуктивності: густоти рослин, рослинної маси, її приросту, площі поверхні фотосинтезуючих органів.

При дослідженні продуційного процесу зрошуваної кукурудзи її посів розглядався як єдина сукупність одновидових рослин, тому фітометричні спостереження проводилися таким чином, щоб можна було дати достовірну характеристику цієї сукупності.

Методика відбору проб. Для одержання надійних даних площі листя і фітомаси посівів важливим є вибір типових рослин. Цей параметр добре корелює з надземною масою рослин і має частотну характеристику, близьку до частотної характеристики маси окремих рослин. За параметр, що є найбільш істотною характеристикою фітомаси $m_з$, прийнята висота рослин H

Протягом вегетації характер зв'язку між $m_з$ і H міняється: у період 3–15-й листок цей зв'язок степеневий, а за період від 15-го листка до молочної стиглості – близький до прямолінійного.

У період 3–15-й листок при нелінійності зв'язку гістограми $m_з$ і H в лінійних шкалах одна одній не відповідають. Але в логарифмічній шкалі вони добре погоджуються між собою. Після проходження фази 15-й листок частотні криві $m_з$ і H добре погоджуються в лінійних шкалах.

Об'єктивність відбору проб рослин досягається за допомогою обліку розподілів $m_з$ і H. Це виконується таким способом. Перед черговим терміном визначення фітомаси виміряється висота необхідної кількості рослин. Спочатку обсяг вибірки для визначення розподілу рослин по висоті досягав 500-1000 рослин. Подальші дослідження показали, що надійну характеристику можна одержати і при обсязі в 200-300 випадково обраних рослин. За отриманими даними будувалася крива розподілу рослин по lg$H$ для періоду 3–15-й лист і по H для другої половини вегетаційного періоду. У відповідності з гістограмою розподілу можна відбирати або модальні, або математично середні рослини, або рослини з різними висотами, коли обсяг вибірки на кожнім інтервалі H пропорційний відносній частоті останнього: $n_i / \sum n_i$.

Найбільшу точність у визначенні надземної маси кукурудзи забезпечує метод середніх зважених по висоті рослин, а у випадку нормального розподілу – і метод модальних рослин. При відборі 10 рослин помилка у визначенні маси за цими методами не перевищує 10 %.

Після цвітіння початка ріст рослин кукурудзи у висоту припиняється, а їхня маса продовжує збільшуватися за рахунок росту початка. Маса листя зменшується у зв'язку з їхнім відмиранням, а приріст стебел наближається до нуля. У цей період сира маса рослин найбільше

тісно зв'язана з діаметром початка d_n ($\eta = 0{,}73 \pm 0{,}03$).

При відборі рослин по середньому зваженому значенню діаметра початка $\overline{d}_n$ або діаметра стебла $\overline{d}_{ст}$ помилки у визначенні маси мають найменші значення (10 %).

Таким чином, відбір рослин, у період вегетативного росту по середніх зважених значеннях висот і в репродуктивний період за такими ж значеннями діаметрів початків чи стебел, забезпечує досить високу точність визначення надземної фітомаси (~10 %) при відносно невеликій вибірці (10-20 рослин).

Визначення рослинної маси. Загальна рослинна маса M включає масу окремих органів: листя $M_л$, стебел $M_{ст}$, репродуктивних органів (у кукурудзи початків) $M_п$ і коренів $M_к$.

Маса кореневої системи кукурудзи, через трудомісткість робіт з її вимірюванням, визначалася 2-3 рази за вегетаційний період.

Для визначення надземної фітомаси відбиралися проби згідно методики, що викладена вище. Відібрані рослини зрізалися, переносилися в приміщення і зважувалися. За цими результатами визначалася сира маса середньої рослини $\overline{m}_з$.

З проби, якщо вона перевищувала 10 рослин, вибиралися 10 типових для неї рослин для більш детального аналізу. Для кожної рослини визначалися: кількість листків, маса листя $m_л$, стебел $m_{ст}$ і початків $m_п$, діаметр стебла $d_{ст}$ у самій товстій частині та його висота $H_{ст}$, довжина листя і їхня ширина (у найбільш широкій частині) і розраховувалися середні значення $\overline{m}_л, \overline{m}_{ст}, \overline{m}_п$ і частка кожного з органів $\gamma_л$, $\gamma_{ст}$ *і* $\gamma_п$ у загальній фітомасі. Значення зазначених величин на одиниці площі посіву визначалися шляхом їхнього множення на густоту N.

У практиці експериментальних досліджень важливим є визначення маси рослин розрахунковим шляхом без зрізання. Ю.І. Чирковим для цієї мети запропонована формула

$$m_{надз.} = \frac{Hd_{ст}}{3} + k \ , \qquad (5.32)$$

де $m_{надз.}$ – розрахована надземна маса рослини;

H – його висота до кінця витягнутих листків;

$d_{ст}$ – діаметр стебла в найбільш широкій частині;

k – поправка на співвідношення між H и $d_{ст}$, значення якої залежать від густоти.

За допомогою цього методу можна розраховувати масу листя і стебел рослин протягом усього періоду вегетації. Для оцінки маси початків досліджувалася динаміка відношення m_n /(m-m_n). Результати

представлені в табл. 5.1, які можуть бути використані для визначення зазначеного відношення для різних фаз. Помноживши це відношення на $m_{надз.}$, розраховане по формулі (5.32), можна розрахувати масу початків, а потім взяти їх суму з $m_{надз.}$, одержимо загальну надземну масу рослин кукурудзи.

Таблиця 5.1 – Залежність відношення маси початків до маси вегетативних органів ($m_n/m–m_n$) рослин кукурудзи від фаз розвитку

Характеристика поля	Фаза розвитку, стиглість			
	викидання волоті	молочна	воскова	повна
Зрошуване з оптимумом добрив	0,25	0,64	0,78	0,88
Зрошуване і незрошуване без добрив	0,20	0,52	0,59	0,59

Вертикальний розподіл фітомаси і площі листя у посіві визначється за допомогою простої установки, що складається з натягнутих між вертикальними стовпами паралельних шнурів. Досліджуваний посів ділили на 10 шарів. Листя і їхні частини зрізали в кожному шарі і зважували, те ж стосувалося й інших органів.

Для одержання сухої фітомаси рослин частину сирої маси висушували і визначали частку сухої речовини μ_r у кожнім з органів r. Суха фітомаса на одиниці площі посіву M_{rc} кожного органа знаходилася шляхом множення сирої маси на μ_r.

Визначення площі листкової поверхні L. Серед існуючих методів визначення площі листкової поверхні найбільш прийнятним для польових умов є ваговий метод, заснований на існуванні тісного зв'язку між площею $s_л$ і масою $m_л$ окремих листків. Цей метод відносний і має потребу в постійному таруванні, тобто у визначенні питомої поверхневої щільності (ППЩ) листя, під якою мається на увазі відношення $u_л = m_л/s_л$. Для визначення $s_л$ застосовувався параметричний чи розрахунковий метод. У цьому випадку $u_л$ визначається в цілому для всього листка. Якщо врахувати, що при детальному аналізі використовуються листки 10 рослин, то одержуємо надійне значення $u_л$ для середньої рослини. Для визначення $s_л$ параметричним методом листок кукурудзи моделюється трикутником, тоді

$$s_л = kab, \tag{5.33}$$

де k – поправочний коефіцієнт;

a – довжина листка по жилці;

b – середня (чи максимальна) ширина листка.

Достоїнством цього методу є те, що за його допомогою можна

визначити площу невідокремлених від рослини листків.

При використанні параметричного методу необхідно враховувати можливі зміни коефіцієнта k у процесі розвитку листка, а також залежність від сорту і гібрида рослини.

Установлено, що інформативність довжини листка про його площу майже така ж, як і добутку двох параметрів a і b. Тому для визначення $s_л$ можна обмежитися тільки одним параметром a по формулі

$$s_л = k_a a^2, \qquad (5.34)$$

де k_a = 0,102 отримано для середньо - і пізньостиглих гібридів ВІР 156, Краснодарський ПГ-303, Дніпровський ПГ-50 з густотою стояння 50-80 тис. росл./га.

При сильній загущеності посівів або при роботі з гібридами іншої морфофізіологічної групи необхідне уточнення коефіцієнта k_a.

5.2.3. Спостереження за станом зовнішнього середовища

*Радіаційний режим і радіаційні властивості посівів***.** У програму радіаційних спостережень входить вимірювання радіаційного балансу B і його складових (прямої сонячної радіації S, сумарної Q, розсіяної D і відбитої $R_к$ радіацій та ефективного випромінювання $E_{еф}$) на метеоплощадці і посівах кукурудзи, вимірювання їхніх вертикальних профілів у РП і визначення радіаційних характеристик посівів в області ФАР. Інтенсивність ФАР вимірювалась фотоінтеграторами Б. И. Гуляєва, удосконаленими Г. В. Голубєвим. Прилади монтувалися на спеціальному стояку, що дозволяє змінювати висоту приладів над посівом. У посіві вимірювався радіаційний баланс без Сонця (B-S')* і розсіяна радіація D*, а також коефіцієнт пропускання прямої сонячної радіації d_s (за допомогою рейки Лопухіна довжиною 200 м шириною 6 см). За цими вимірюванями визначався баланс короткохвильової (КХ) радіації рослинного покриву $B_{к.РП}$ як різниця балансів над рослинами і під ними

$$B_{к.РП} = (Q - R_к) - (1 - A_{к.п})\{a_S S' + D_T^*[1 + a_S(D_0^* - 1)]\}, \qquad (5.35)$$

де $A_{к.п}$ – альбедо ґрунту під посівом;

D^*_0 *і* D^*_T – розсіяна радіація на освітлених і затінених ділянках ґрунту під рослинами.

Останній член у рівнянні (5.35) являє собою середнє значення розсіяної радіації $\overline{D}_o$ у міжряддях. Дослідженнями було показано, що таке значення $\overline{D}_o$ можна одержати приблизно на відстані 1/3 ширини

міжряддя від рядка.

Оцінка точності визначення $B_{к,РП}$ показала, що основним джерелом помилок є недостатньо надійне осереднення в посіві коефіцієнта пропускання a_S. Для виявлення необхідної точності осереднення a_S через намічене для робіт місце потрібно провести детальну зйомку коефіцієнта a_S , визначити його середнє значення для всієї ділянки і провести осереднення даних у 20- тикратній повторності, знайти відхилення $\bar{a}_S - a_{S,20}$ і побудувати графік їхнього ходу уздовж смуги посіву. На графіку знайти відрізок з найменшими значеннями ($\bar{a}_S - a_{S,\ 20}$) і їх використовувати для спостережень за радіаційним режимом.

За даними вимірювань інтегральної і фотосинтетично активної радіації над і під РП визначаються наступні показники радіаційного режиму посіву:

– коефіцієнти пропускання прямої a_S, розсіяної a_D, сумарної a_T і фотосинтетично активної радіації (ФАР) як відношення відповідних потоків під рослинами і над ними;

– альбедо посіву і ґрунту для сумарної радіації і ФАР;

– коефіцієнти ослаблення ефективного випромінювання $\varepsilon_T = E^*_{еф}/E_{еф,н}$ і повного радіаційного балансу $b_T = B^*/B_н$, де зірочкою позначені потоки під РП, а індексом "н" – над РП;

– коефіцієнти поглинання сумарної (a_n), ФАР ($a_{nФ}$), довгохвильової радіації (ε_n) і повного радіаційного балансу (b_n) як відношення поглиненої радіації ($\Delta B_к$, $\Delta B_Ф$, $\Delta E_{еф}$ і ΔB) до значення цих потоків над РП ($Q_н$, $Q_{Ф,н}$, $E_{еф.н}$ і $B_н$).

При вивченні вегетаційного ходу радіаційних характеристик використовувалися середні зважені за день і добу значення $\bar{A}_к$, $\bar{a}_T$, $\bar{a}_n$ та ін. Перевагою цих величин є те, що в межах вегетаційного періоду вони практично не залежать від висоти Сонця і його азимута, а визначаються головним чином ступенем розвитку РП і його станом.

Спостереження над вертикальним розподілом радіаційних потоків усередині РП виконувалися за допомогою піранометрів і балансомірів, установлених на спеціальному стояку. Вимірювання проводились п'ять-шість разів за добу.

Усередині травостою міряли низхідний потік розсіяної радіації D_z , радіаційний баланс без Сонця $(B\text{-}S')_z$ і коефіцієнт пропускання прямої сонячної радіації $a_s(z)$. Одночасно проводились неперервні вимірювання або реєстрація Q, $R_к$, $B - S'$ і S на висоті 1,5 м над РП.

За цими даними визначалися для різних рівнів z коефіцієнти пропускання сумарної радіації Q, радіаційного балансу B и ефективного випромінювання $E_{еф}$

$$a_T(z) = \frac{Q_z}{Q_н}\ ; \qquad b_T(z) = \frac{B_z}{B_н}\ ; \qquad \varepsilon(z) = \frac{E_{еф,z}}{E_{еф,н}} \tag{5.36}$$

і коефіцієнти поглинання

$$a_п(z) = \frac{B_{к,z_{i+1}} - B_{к,z_i}}{Q_{z_i}} = \frac{\Delta B_к(\Delta z)}{Q_{z_i}}; \tag{5.37}$$

$$b_п(z) = \frac{B_{z_{i+1}} - B_{z_i}}{B_{z_i}} = \frac{\Delta B(\Delta z)}{B_{z_i}}; \tag{5.38}$$

$$\varepsilon_п(z) = \frac{E_{еф,z_{i+1}} - E_{еф,z_i}}{E_{еф,z_i}} = \frac{\Delta E_{еф}(\Delta z)}{E_{еф,z_i}}\ . \tag{5.39}$$

Аналіз даних вертикальної структури поля короткохвильової радіації показав, що міряти профілі висхідної короткохвильової радіації усередині РП кукурудзи недоцільно через екранування альбедометром низхідного потоку радіації до фітоелементів усередині посіву.

Для обліку зміни $A_к(z)$ по висоті при обробці результатів вимірів вертикальних профілів короткохвильової радіації значення $A_к(z)$ визначалися за такою методикою. Мірялись $A_{к,РП}$ над РП і $A_{к,п}$ під посівом на висоті 30-40 см над ґрунтом. За значеннями $A_{к,РП}$ і $A_{к,п}$ та вертикальному профілю коефіцієнта a_S визначалися значення альбедо на всіх проміжних рівнях z_i, по формулі

$$A_{к,z_i} = A_{к,РП}(a_{S,z_i} - a_{S,0}) + A_{к,п}[1-(a_{S,z_i} - a_{S,0})]\ , \tag{5.40}$$

де $a_{,0}$ і $a_{,z}$ – значення a_S на поверхні ґрунту і рівнях z_i.

Для вимірів характеристик посіву в області ФАР один із приймачів ФАР кріпився на капроновому підвісі, установленому на вертикальному дюралюмінієвому стояку, а другий – на спеціальній штанзі, що дозволяє переміщати приймач у посіві в горизонтальному напрямку. Першим приладом мірялась прихідна на посів, другим – пропущена і відбита від посіву і ґрунту ФАР. Перед кожною серією вимірів і після їх закінчення показання обох приладів звірялися між собою шляхом сінхронного вимірювання сумарної ФАР. Для одержання надійних значень $a_{T,Ф}$, виміри ФАР проводились в 5-6 міжряддях, розташованих у різних частинах експериментальної ділянки.

Дослідження термічного режиму і теплового балансу посівів проводяться шляхом вимірювання і визначення наступних елементів:

температури і вологості повітря в посіві на висоті 0,1 м над поверхнею ґрунту; температури, вологості повітря і швидкості вітру на висотах 0,5; 1,0; 2,0 м над шаром витиснення; температури поверхні ґрунту і на глибинах 5, 10, 15 і 20 см; складових радіаційного балансу на висоті 1,5 м над посівом; екстремумів температури повітря в метеорологічній будці і температури поверхні ґрунту.

Психрометри й анемометри кріпилися на стояках, що дозволяють переміщати прилади у вертикальному і горизонтальному напрямках. Весь комплекс градієнтних спостережень на кожнім полі виконувався в двох повторностях. Середні за годину значення температури і вологості повітря на кожному з рівнів визначалися як середнє з 18 відліків. Це забезпечувало одержання надійних значень градієнтів температури ΔT і вологості Δe повітря, які надалі використовувалися для розрахунку складових теплового балансу.

Температура ґрунту в посіві T_n визначалася за допомогою ртутних термометрів, встановлених у рядку і міжрядді в двох повторностях. Отже, кожне значення T_n визначалося по 4-х термометрах три рази за годину наприкінці кожних десяти хвилин. Таким чином, середні за годину значення T_n розраховувались з 12 відліків. Така методика забезпечує задовільне осереднення, як у просторі, так і в часі.

Обробка спостережень за складовими теплового балансу проводилась відповідно до методики в основі якої лежить спрощене рівняння теплового балансу підстильної поверхні

$$B = P + LE + q, \qquad (5.41)$$

де B – радіаційний баланс підстильної поверхні;

P – турбулентний потік теплоти;

LE – витрата теплоти на випарування (L - питома теплота паротворення, E-потік водяної пари або сумарне випарування);

q – потік теплоти в ґрунт.

Для одержання стійких характеристик складових теплового балансу (з помилкою не більш 5 %) необхідно осереднення не менш чим по 10 відлікам.

Воднобалансові спостереження включали визначення динаміки продуктивних вологозапасів ґрунту, опадів, кількості поливної води, випарування з поверхні ґрунту під рослинами. Проводилися ці спостереження на воднобалансових площадках розміром 100×100 м^2, розташованих поруч з теплобалансовими площадками. Спостереження за елементами водного режиму рослин включали вимірювання водного дефіциту листя рослин, концентрації клітинного соку. Сюди ж можна

віднести і спостереження за ступенем відкриття устячок.

Визначення вологозапасів ґрунту, випарування і норм поливу. Запаси продуктивної (доступної рослинам) вологи в ґрунті визначалися термостатно-буровим методом до глибини 1,5 м, через кожні 10 см. Для оцінки вологообміну цього шару з нижче розташованими шарами на початку і наприкінці періоду спостережень, вологозапаси в окремі роки визначалися до глибини 5 м, спостереження за вологозапасами ґрунту проводилися щодекадно, а також до і після поливу. З метою оцінки репрезентативності воднобалансових площадок проводилася детальна зйомка вологості ґрунту на полі шляхом узяття проб у 30-ти повторностях.

Для забезпечення надійності даних про вологозапаси ґрунту і підвищення їхньої точності повторність узяття проб складала 8-10 свердловин на богарі і 14-18 на зрошуваних полях. Точність визначення вогозапасів при цьому була не нижче 5 %.

Оцінка вологозапасів ґрунту в дні між термінами їхнього визначення проводилася шляхом лінійної інтерполяції з урахуванням даних про динаміку сумарного випарування, отриманих за методом теплового балансу і кількості опадів, що випали, *X*.

Сумарне випарування *E* визначається за рівнянням водного балансу

$$E = W_1 - W_2 + X - r_в - r_г - r_{пов}, \qquad (5.42)$$

де W_1 і W_2 – початкові і кінцеві за розрахунковий період вологозапаси розрахункового шару ґрунту (мм);

$r_в$, $r_г$ і $r_{пов}$ – складові вертикального, горизонтального і поверхневого стоку. Аналіз динаміки вологозапасів у шарі 0-500 см показав, що у випадку добре спланованих полів в умовах зрошення і при недоліку вологи складовими стоку можна знехтувати. Тоді формула для розрахунку *E* спрощується

$$E = W_1 - W_2 + X. \qquad (5.43)$$

Уся поливна вода й опади, що випали, акумулювалися переважно у верхньому шарі, товщина якого, як правило, не перевищувала 70 см при поливі дощуванням і 100 см при поливі по борознах.

Оскільки вологозапаси ґрунту мірялись щодекадно, той і сумарне випарування *E*, визначалося за декади. Добові значення *E,* визначалися за методом теплового балансу.

Порівняння декадних значень сумарного випарування, отриманих за допомогою водного балансу $E_в$ з аналогічними значеннями теплового балансу $E_{тб}$ показало, що в середньому $E_{тб}$ вище $E_в$ на 10%. Це розходження усувалося шляхом введення спеціальної поправки до значень

$E_{тб}$. Виправлені значення $E_{тб}$ добре погоджуються з даними, отриманими за рівнянням водного балансу.

Випарування із ґрунту під РП мірялося ґрунтовими випарниками ГГІ-500-50, що встановлювалися на воднобалансових площадках у 4-х кратній повторності і зважувалися один раз у 5 днів. При зміні ґрунтових монолітів у них проводився контроль вологості ґрунту. Значення випарування з ґрунту E_n, які розраховувались по різниці маси випарників і по динаміці вологозапасів ґрунту, розрізнялися між собою за період вегетації кукурудзи не більше ніж на 5 %.

Транспірація рослин $E_{тр}$ розразовувалась як різниця між сумарним випаруванням і випаруванням із ґрунту під РП:

$$E_{тр} = E - En. \qquad / \qquad (5.44)$$

Опади на полях мірялися ґрунтовими дощомірами у 4-х кратної повторності, встановленими в міжряддях на різних відстанях від рослин.

Кількість поливної води при дощуванні визначалося також ґрунтовими дощомірами і дощомірами Давітая, встановленими в більшій повторності. При поливі по борознах норма поливу визначалася витратоміром конструкції Н. В. Пікуша.

*Спостереження за водним дефіцитом рослин кукурудзи***.** Однією з можливих характеристик водного режиму рослин може служити водний дефіцит листя рослин. Методика визначення водного дефіциту листя зводиться до того, що висічки з листя рослин зважуються (m_o) і на якийсь час занурюються в дистильовану воду для досягнення повного насичення, а потім знову зважуються ($m_{нас}$). Водний дефіцит $d_л$ визначається як відношення:

$$d_л = \frac{m_{нас} - m_0}{m_{нас}} \cdot 100\% \ , \qquad (5.45)$$

Добір висічок варто робити свердлами діаметром 6-10 мм, оптимальний обсяг вибірки складає 20 висічок. При відборі висічок важливим є вибір ярусу листя і місць на листках для одержання об'єктивної характеристики $d_л$. У зв'язку з тим, що водний дефіцит зростає зі збільшенням віку листя (їхнього номера зверху вниз), вибирається ярус листків із середніми значеннями $d_л$, які активно фотосинтезують і транспірують. Таким умовам відповідає 3-й лист зверху.

При виборі репрезентативного місця на листку для узяття висічок були визначені значення $d_л$ у верхній, середній і нижній частинах листка. Виявилося, що біля полудня $d_л$ у центральній частині листка істотно

нижче, ніж у верхній частині листка. Оскільки верхня частина листка більш чуттєва до зміни зовнішніх умов, вона і була обрана як об'єкт узяття висічок. Серія експериментів була присвячена визначенню тривалості насичення висічок. Ці експерименти показали, що необхідним і достатнім є 2-х разовий інтервал насичення.

Таким чином, описувана методика визначення водного дефіциту листя кукурудзи зводиться до наступного. На верхній частині листя третього ярусу береться 20 висічок діаметром 6-10 мм, що зважуються на торсійних терезах, а потім заливаються дистильованою водою і насичуються протягом 2 год. Після насичення висічок, вони промокаються фільтрувальним папером і повторно зважуються. Різниця в масі, що віднесена до маси насичених висічок та виражена у відсотках, і представляє водний дефіцит.

5.3 Польові експериментальні вимірювальні інформаційно-прогнозуючі комплекси

5.3.1 Загальні принципи розробки науково-дослідного мікрокліматичного комплексу НДАК

Одним із перспективних напрямків вирішення проблеми агрометеорологічного забезпечення технологічного рівня сільськогосподарського виробництва є розробка і впровадження в умовах конкретного виробника автономних вимірювальних інформаційно - прогнозуючих комплексів. Концепція цього напрямку наукової і методичної роботи сформульована В.В. Вольвачем.

Одним з головних достоїнств таких комплексів, поряд з вирішенням проблеми автоматизації агрометеорологічних вимірювань, формування баз даних і їхнього представлення, є можливість створення на їхній основі завершеної за структурою системи агрометеорологічного забезпечення конкретного споживача. Під завершеною структурою системи агрометеорологічного забезпечення підрозумівається система від вимірювання до видачі споживачу рекомендацій, порад і прогнозів у реальному масштабі часу і у визначеному їм місці і виді.

Першим прикладом створення польових вимірювально-інформаційних систем на базі персональних комп'ютерів і мікропроцесорів може розглядатися науково-дослідний мікрокліматичний комплекс НДАК, розроблений В.В.Вольвачем разом з Центром автоматизації і метрології АН Молдови. Комплекс НДАК призначений для вирішення науково-дослідних і прикладних задач в області агрометеорології і мікрокліматології.

Технічні дані комплексу НДАК наступні. Діапазон вимірювання

температури повітря від мінус 20°С до 40°С на восьми рівнях до висоти 10 м, абсолютна похибка вимірювання температури не більш 0,2°С. Температура ґрунту міряється до глибини 1 м, кількість каналів – 8. Відносна вологість повітря міряється в межах від 10 до 100% із приведеною похибкою не більш 4%. Кількість каналів вимірів вологості – 8. Діапазон вимірювання швидкості вітру від 0,5 до 15 м/с на висотах до 8 м, кількість каналів вимірювань складових швидкості вітру – 9, з можливістю розширення до 24. Діапазон вимірювань сумарної сонячної радіації від 0 до 1,35 кВт/м, приведена похибка не більш 10%. Представлення вимірюваних параметрів на екрані відеотерміналу або у твердій копії у вигляді таблиць і графіків. Періодичність вимірювань задається дискретно з інтервалом від 2 хв до 200 діб. Є два режими роботи комплексу – автоматичний і по разовому запиті.

НДАК являє собою вимірювально-обчислювальний комплекс, орієнтований на застосування в агрометеорологічних і мікрокліматичних експериментах у польових умовах. Комплекс розроблений за принципом розподіленої децентралізованої системи з дворівневою ієрархією. Нижчий рівень – локально-вимірювальні пристрої (ЛВП) – відповідальні за вимірювання параметрів середовища, попередню обробку, буферне збереження і передачу на верхній рівень. Верхній рівень – апаратно-програмний комплекс "Центр" (АПК), веде знімання даних з ЛВП, систематизацію, збереження, обробку і представлення інформації користувачу, задає ЛВП початкові умови і режим роботи. Структурна схема комплексу НДАК представлена на рис. 5.12.

Конструктивно комплекс НДАК являє собою сукупність технічних засобів, серійно випускаємих і заново розроблених приладів, датчиків і устаткування, призначених для використання в польових умовах. НДАК змонтований на базі автомобіля УАЗ-432 і причіпа ГАЗ-704.

Датчики для вимірювання температури повітря і ґрунту являють собою нікелеві термометри опору, виконані за допомогою тонкоплікової технології. Чуттєвий елемент для вимірювання вологості являє собою гігрістор, конструктивно виконаний у виді сітки електродів, напиленого на кристал кремнію і покритий шаром вологочуттєвого полімеру.

Для датчиків сумарної радіації використовуються стандартні актинометричні головки М-117. Первинні вимірювальні перетворювачі горизонтальної і вертикальної складових швидкості вітру виконані у виді металополімерної матриці з чотирьох терморезісторів, з'єднаних у два напівмости.

Вага апаратного блоку ЛВП не більш 4 кг, його габаритні розміри 20×20×40 см. Розміщається апаратний блок у верхньому герметичному стояку ЛВП, у нижній секції стояка знаходиться акумуляторна батарея блоку живлення ЛВП.

Розгортання комплексу в польових умовах з повним комплектом датчиків у складі шести ЛВП проводиться за два робочих дня чотирма фахівцями.

Протягом декількох польових сезонів комплекс НДАК експлуатувався в умовах агрометеорологічного полігона по розробці способів боротьби з приморозками в Молдавії. Полігон розташовувався в пальметному саду міжколгоспсаду "Молдова" Григоріопольського району. Схема розміщення комплексу НДАК на полігоні приведена на рис. 5.13.

Комплекс експлуатувався в широкому діапазоні умов середовища і показав високу працездатність при значеннях температури близьких до граничних. ЛВП стійко функціонували при температурі трохи нижче мінус 10°С, в умовах тривалих опадів і туманів, при швидкості вітру більше 15 м/с .

Використання комплексу НДАК для проведення градієнтних і мікрокліматичних спостережень за один польовий сезон забезпечує одержання такого обсягу інформації, на який приладами, що серійно випускаються, і методиками потрібна участь 30-35 метеоспостерігачів та 4-6 інженерів-метеорологів і таку ж кількість допоміжного персоналу. З урахуванням наступної обробки матеріалів спостережень, складання зведених таблиць і побудови графіків треба було б ще не меншої кількості фахівців.

Результати градієнтних вимірювань комплексом НДАК на молдавському агрометеорологічному полігоні під час виконання впливу на приземний шар повітря вертольотом Ка-26 явились експериментальним обґрунтуванням динамічного способу боротьби з приморозками і були покладені в основу всієї розробленої для даного методу нормативно-технічної документації. Крім цього вони були використані для параметризації трьохмірної моделі динамічного способу впливу на температурний режим приземного шару повітря вертольотами.

Третій результат застосування комплексу НДАК в експериментальних дослідженнях на агрометеорологічному полігоні полягає в оцінці садо- і породопридатності території за результатами мікрокліматичних зйомок. На основі даних комплексу НДАК було встановлено, що проектне розміщення в саду культур у межах полігона виявилося помилковим для кісточкових культур – персика й абрикоса. Вони були розміщені в самій приморозконебезпечній частині полігона (на схемі це ділянка, де знаходилося ЛВП 3). Інтенсивність приморозків на зазначеній території в порівнянні з яблуневим садом завжди виявляється на 4-5 °С вище через особливість мікрорельєфу, що відображено в нижній частині схеми (див. рис. 5.13). У такій же мірі ця частина полігона є і більш морозонебезпечною.

5.3.2 Комплекс електронного агрометеоролога (Елагр) для агрометеорологічного моніторингу

У зв'язку з тим, що задача автоматизації агрометеорологічних вимірювань і спостережень, обробки результатів спостережень і представлення інформації є актуальною не тільки при вирішенні дослідницьких програм, але і для спостережливої мережі станцій, була здійснена розробка комплексу електронного агрометеоролога (Елагр) для агрометеорологічного моніторингу і фітосанітарного прогнозування

По класифікації, прийнятою Всесвітньою метеорологічною організацією для автоматичних станцій, комплекс Елагр варто відносити до автоматичних станцій, що функціонують у режимі кліматичних станцій, тобто без виходу в реальному масштабі часу в канали зв'язку.

Комплекс Елагр призначений для використання як засобу вимірювання, обробки і доведення інформації до споживача, він забезпечує:

– автоматизований моніторінг метеорологічних і агрометеорологічних параметрів на метеорологічній площадці чи спостережливій ділянці;

– автоматизацію виконання агрометеорологічних розрахунків, прогнозів і рекомендацій на низовому рівні спостережливої мережі;

– автоматизацію накопичення режимних і довідкових матеріалів на пунктах спостережень для документування їх на довгострокових носіях.

При сполученні комплексу з апаратурою передачі даних у канали зв'язку він може виконувати функції синоптичної станції.

Комплекс Елагр виконаний на блочно-модульному принципі і містить у собі:

– апаратно-програмний мікропроцесорний центральний блок;

– комплект датчиків метеорологічних параметрів;

– блоки живлення автономний і мережний;

– контролер сполучення центрального блоку з ПК;

– рідкокристалічний восьмирозрядний дисплей;

– комплект монтажних частин для установки датчиків і комплексу в польових умовах.

Габаритні розміри центрального блоку 30×15×12 см, маса з блоком автономного живлення не більше 3 кг. Склад вимірюваних агрометеорологічних параметрів приведений у табл. 5.2. Є можливість для розширення кількості вимірюваних параметрів до 16. Споживаний струму у режимі чекання не більш 0,5 мА, у режимі вимірювання не більше 35,0 мА.

Таблиця 5.2 – Агрометеорологічні параметри, що вимірюються комплексом Елагр та їх метрологічні характеристики

Параметр	Первинний вимірювальний перетворювач	Діапазон вимірювань	Границя допустимої похибки	Період осереднен-ня, хв	Дистанцій-ність датчи-ків, м
Температура повітря	ЕПЧ-0183	від -50 до 50 °С	0,3 °С	2-10	до 100
Температура поверхні грунту	ЕПЧ-0183	від -50 до 50 °С	0,3 °С	2-10	до100
Температура грунту на глибині	ЕПЧ-0183	від -50 до 50 °С	0,3 °С°	2-10	до 100
Відносна вологість повітря	ІВП-2М	від 10 до 100 %	3 % при t 0°С	2-10	до 100
Тривалість наявності роси	ДПР-1	від 10 до 24 год	15 хв	2-10	до10
Сума опадів	ДЖО	від 0 до100 мм/год.	(0,15+0,2R)	2-10	до 100
Вагова вологість грунту	ІПП-1	від 4 до 45 %	4 %	2-10	до 10
Швидкість лінійного росту рослин	СЦ-1	від 0,001 мм/год.		1	до 10

Центральний блок комплексу забезпечує оператору можливість роботи в діалоговому режимі за допомогою клавіатури, реалізуючи наступні функції:

– введення в режим автоматизованого моніторингу, розрахунків і прогнозування;

– завдання і зміна режиму вимірювання;

– перегляд поточних, погодинних та добових баз даних і результатів розрахунків по прикладних моделях;

– введення невимірюваної датчиками інформації і редагування даних;

– занесення баз даних на модуль змінної пам'яті;

– контроль технічного і функціонального стану комплексу.

Програмне забезпечення комплексу здійснює контроль і самодіагностику функціонального стану центрального блоку, комплекту датчиків, блоку живлення, а також формує і веде три бази даних:

– результати щогодинних вимірювань за 10 останніх діо;

– середньодобові значення вимірюваних параметрів в обсязі 366 діб;

– результати розрахунків і прогнозів по прикладних алгоритмах в

обсязі 10 моделей.

Робочі кліматичні умови експлуатації складових частин комплексу: для центрального блоку температура повітря від –10 до 50 °С, відносна вологість повітря до 98 % при температурі 25 °С; для комплекту датчиків і монтажних частин, установлених на відкритому повітрі, температура повітря від –50 до 70°С, відносна вологість повітря до 98 % при 35 °С. Технічне обслуговування комплексу проводиться по мірі необхідності і полягає в контролі напруги на змінному блоці автономного живлення і наприкінці вегетаційного періоду в профілактиці стану датчиків і центрального блоку.

Комплекс Елагр-2 оснащений інтерфейсом RS-232, що дозволяє здійснювати зв'язок комп'ютера з датчиками через виносний блок сполучення на відстань до 800 м.

Як і комплекс Елагр-1, комплекс Елагр-2 призначений для автоматизованого моніторингу агрометеорологічних параметрів у посівах або на метеорологічній площадці з накопиченням баз даних по температурі повітря і ґрунту, відносної вологості повітря, тривалості наявності роси, суми опадів. Він забезпечує автоматизацію виконання розрахунків погодинних, середньодобових, середньодекадних і середньомісячних значень вимірюваних параметрів, дат переходу температури повітря і ґрунту через визначені межі, сум ефективних і активних температур вище визначених меж, значень гідротермічних коефіцієнтів.

До складу комплексу Елагр-2 входить комплект метеорологічних датчиків, блок виносний електронний, кабель зв'язку, мережне джерело живлення. Технічні характеристики блоку виносного електронного такі: період опитування датчиків (задається періодичність подачі команд із комп'ютера) – 1 година, напруга живлення – 6 В, середня споживана потужність 10 мвт, максимальна довжина кабелю зв'язку блоку з персональним комп'ютером – 800 м, кількість жил у кабелі – 5, габаритні розміри блоку 50×160×180 мм. Схема підключення комплексу Елагр-2 приведена на рис. 5.14

Інтерфейс зв'язку, виконаний за стандартом RS-232C, забезпечує двосторонній зв'язок виносного блоку з комп'ютером. Лінії прийомопередачі виносного блоку гальванично розведені від відповідних ліній комп'ютера за допомогою оптронів.

Програмне забезпечення комплексу Елагр-2 "Система агроекологічного моніторингу і фітосанітарного прогнозування" розроблена в середовищі DELPHI 1 (для роботи в середовищі WINDOWS 3.1) і в середовищі DELPHI 2 (для роботи в середовищі WINDOWS 95). Програма здійснює:

– збір метеорологічних даних за допомогою виносного блоку; первинну обробку введених даних (переклад з машинного формату у фізичний);

– відображення введених даних на екрані монітора комп'ютера;

– запис введених даних у годинну і добову бази даних;

– видачу результатів розрахунків по прикладних моделях.

Програма може функціонувати на будь-якій апаратній платформі, починаючи з АТ-486.

Після запуску програми на виконання оператор взаємодіє з нею через її форму (вікно програми на екрані дисплея). Форма містить: меню, віконця даних, вікно повідомлень (центральна частина екрана), що має заголовок, і рядок статусу. У вікно повідомлень виводиться вміст баз даних у різних форматах (годинна, добова і т.д.), а також прогнози. Суть виведених даних чи повідомлень пояснюється заголовком.

Під час роботи програми оператору завжди доступно меню першого рівня, що містить наступні вибори: ПЕРЕГЛЯД, ПРОГНОЗ, ДРУК, ДОВІДКА. Меню дозволяє оператору оперативно (у ході роботи) впливати на роботу програми. Вибір меню ПЕРЕГЛЯД забезпечує перегляд вмісту баз даних у різних форматах. Вибір має меню другого рівня, пункти якого призначають формат перегляду: годинний, добовий, декадний, місячний. Вміст баз даних в обраному форматі з'являється у вікні повідомлень з відповідним заголовком. Вибір меню ПРОГНОЗ дозволяє вибрати вид прогнозу. На даному етапі підтримується три методи прогнозу: приморозку, розвитку колорадського жука, розвитку парші яблуні. Вибір меню ДРУК дозволяє одержати тверду копію (виводити на принтер) вміст вікна повідомлень. Це дозволяє надрукувати зведення метеорологічних даних у різних форматах, а також прогнози.

В основу моделі розвитку парші яблуні покладені кількісні залежності впливу агрометеорологічних умов на характеристики життєвого циклу захворювання й інтенсивність зараження, отримані в результаті аналізу вітчизняних і закордонних архівних і літературних даних. Вплив температурних умов і тривалості краплинно-рідкого зволоження листя яблуні на інтенсивність її ураження паршою виражає рівняння

$$z(\tau, t) = (0{,}0928\tau_i + 1{,}125 - \frac{2{,}656}{0{,}163t_x^2 - 1{,}372t_x + 3{,}5}\ , \qquad (5.46)$$

де $z(\tau,t)$ – безрозмірний показник ступеня сприятливості умов для зараження листя і плодів;

τ_i – тривалість періоду безупинного зволоження в годинах по датчику роси;

t_x– середнє значення температури повітря за період τ_i,.

Для розрахунку залежності (5.46) використовувались архівні дані, відомі в літературі як таблиці Мілса.

При вирішенні задачі призначення хімічних обробок і термінів їхнього проведення за результатами роботи моделі розвитку парші за основу була прийнята система захисту яблуні від парші, запропонована фірмою Cuba - розроблювачем системних фунгіцидів Хорус і Скор, що передбачає для ефективної і екологічно безпечного захисту яблуні не більш двох обробок кожним із зазначених фунгіцидів.

Найбільш значимою перевагою нової версії комплексу Елагр-2 є можливість адаптації включаємих в склад його прикладного програмного забезпечення моделей розвитку захворювань і шкідників та інших технологічних процесів до умов конкретного споживача за результатами його експлуатації за ряд вегетаційних сезонів чи навіть до початку такої експлуатації за умови наявності необхідних архівних матеріалів або іншої інформації, що відбиває ці особливості і підлягає обліку при рішенні його виробничих задач.

6 СТАЦІОНАРНІ І ПЕРЕСУВНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЖИТТЄДІЯЛЬНІСТЬ РОСЛИН

6.1 Експериментальне моделювання гідротермічних умов осіннього, зимового і весняного періодів

Основна частина знань по перезимівлі і зимостійкості рослин, отримана польовими методами і методами прямого проморожування рослин.

Найбільш розповсюдженим методом визначення морозостійкості рослин у даний час є метод прямого проморожування озимих у низькотемпературних камерах. Так проводиться оцінка сортів озимих культур на морозостійкість.

6.1.1 Стаціонарні і пересувні польові низькотемпературні камери

Весняні й осінні заморозки згідно робіт А.І. Коровіна, Є.В. Мамаєва, В.М. Мокієвського моделюються за допомогою стаціонарних і пересувних польових низькотемпературних камер, виготовлених на базі торгової холодильної камери НКР-1 і холодильної установки АР-4. Ці камери відрізняються великою потужністю, можливістю одержувати в них температури до –30 °С.

Сконструйовано два типи холодильних камер. Перший виготовлений по типу камер заморозків Сибірського інституту фізіології і біохімії рослин (СІФІБР) СВ АН СРСР на базі торгової холодильної камери НКР-1 з тією різницею, що замість одного компресора ФАК-1,5 поставлено два. Відповідно збільшене і число випарників. Така камера дає заморозки до –15 °С (рис 6.1, А). При слабких заморозках звичайно використовується один компресор, другий є запасним. При більш сильних заморозках включаються обидва компресори. Корисна площа камери близько 3 м^2.

Другий тип камери виготовлений також на базі НКР-1, але з застосуванням холодильної установки АР-4. Її корисна площа збільшена до 4,5 м^2, об'єм до 9 м^3 за рахунок ліквідації передкамери. Холодильна установка АР-4 дозволяє одержувати температуру повітря в камері до –30 °С. Остання дає можливість проводити досліди з усіма зимуючими культурами в зимовий період і створювати весінні й осінні заморозки будь-якої інтенсивності, з будь-якою структурою.

Принципова її схема приведена на мал. 6.1, Б. Стаціонарні низькотемпературні камери (СНК) практичні в роботі. Їхнім недоліком є деяке підсушування повітря в період одержання весняних і осінніх

заморозків.

При зимових проморожуваннях, коли основне значення має температура ґрунту, особливо в зоні вузла кущіння, ці камери відмінно виконують своє призначення. При одержанні ж заморозків, особливо весняних, бажано вживати заходів для дозволожненню повітря. Цей недолік у значній мірі усунутий у польових пересувних низькотемпературних камерах (ПНК). Ці камери виготовлені на базі холодильної установки АР-4 і в принциповій схемі аналогічні СНК (рис 6.2).

Різниця полягає в тому, що ПНК пересувається за допомогою трактора і не має підлоги. Вона встановлюється безпосередньо на ділянку в полі і з її допомогою заморозок (у теплий час року) чи мороз і відлига (у холодний час року) відтворюється безпосередньо в полі.

Принципова схема польової пересувної низькотемпературної камери приведена на рис 6.2. Каркас камери виготовлений з дюралюмінієвого кутика розміром 40×40 мм. Зовнішня поверхня камери, обшита листовим дюралюмінієм товщиною 1 мм. Внутрішня поверхня бокових стінок камери обкладена термоізоляційним матеріалом – пінопластом ПС-4 (пінополістерол) товщиною 50 мм і покрита поліетиленовою плівкою.

Верхня стінка (стеля) камери зроблена з двох шарів поліетиленової плівки, між якими находиться повітряний простір – повітряна 50-60-ти міліметрова подушка. Камера за допомогою болтів жорстко з'єднана з холодильною установкою АР-4. До установки АР-4 прикріплений пристрій для стикування камери з трактором

Після переміщення за допомогою гідравліки трактора камера як начіпне знаряддя піднімається й опускається. У момент транспортування камера піднята. Підводячи камеру до дослідного поля, трактор насуває камеру на дослідну ділянку з рослинами й опускає її. Зазори (нерівності) між ґрунтом і основою камери заповнюються за допомогою прошарку з поролону, прикріпленого до основи камери. Для контролю, настроювання і перевірки роботи датчиків, термометрів, стану рослин, реєструючих приладів і т.п. у боковій стінці камери є двері.

Установка АР-4 працює як від електромотора, так і від бензинового двигуна, вмонтованих усередині установки. Наявність бензодвигуна дає можливість використовувати камеру в будь-яких польових умовах. Для створення підвищених температур (відлиги) у нижній частині камери встановлюється підігрівник-калорифер, що працює на електрострумі. Принцип регулювання температурного режиму в польовій пересувній і стаціонарній камерах, практично однаковий. Різниця полягає в тому, що в умовах поля ґрунт служить додатковим джерелом вологи, тепла або холоду під час роботи камери, це завжди варто враховувати при програмуванні створюваних у камерах режимів.

Задані режими можуть створюватися шляхом ручного чи автоматичного регулювання за допомогою пристрою, що додатково монтується на установці. Пересувна камера може працювати в режимі стаціонарної і дає ті ж результати, що і стаціонарна. За допомогою польової камери в зимових умовах можна одержувати будь-які низькі температури до –30°С протягом декількох діб. Камера працює стійко при температурах нижче 0°С. При тривалій роботі її випарники обростають «шубою» і холодопродуктивність установки падає. Потрібно видаляти «шубу» без порушення режиму роботи камери. Крім низьких температур за допомогою польової камери можна створювати зимові відлиги, у цьому випадку включається підігрів. Сполучення підігріву й охолодження дозволяє регулювати хід відлиги або хід морозів. За допомогою польових камер можна створювати будь-якої сили і тривалості весняні й осінні заморозки адвективного типу. Поява світлопрозорих плівок нового типу надалі дозволить моделювати адвективно-радіаційні заморозки.

Наявність світлопрозорої стелі в пересувній камері дозволяє не порушувати світлові умови нічного періоду, що неможливо в стаціонарних умовах. Моделювання морозів, заморозків, низьких позитивних температур, відлиг безпосередньо в полі за допомогою польових пересувних низькотемпературних камер, відкриває великі можливості для наукової праці у всіляких напрямках. Особливо перспективне їхнє застосування в селекції рослин. За допомогою їх можна буде створювати практично всі можливі температурні умови несприятливих періодів осені, зими і весни, моделювати необхідні типи осені, зими і весни, властиві району роботи селекціонера. Камери дозволять не тільки відбирати необхідний матеріал по ознаках стійкості до заморозків, морозів, відлиг, але і бракувати гібридний матеріал, доводити його до наміченого рівня стійкості.

6.1.2. Моделювання штучних заморозків

Методика натурного моделювання заморозку згідно робіт А.І. Коровіна зводиться до наступного. Заморозок моделюється, як правило, у нічний час. Температура повітря в камері при заморозку реєструється за заданою програмою автоматично з точністю ±0,25 °С за допомогою моста ЕМЛ-212, переробленого для роботи з фотоелектричним регулюючим пристроєм (програмним лекалом, яке кріпиться на діаграмний диск). Програмний регулятор дозволяє задавати зміни температури заморозків по будь-якій кривій. Діапазон змін температури обмежений тільки потужністю холодильного апарата і встановлених у камері електронагрівників. Найчастіше моделюється три типи «стандартних» заморозків: легкий заморозок (від –1 до –2°С), середній (від –3 до –4 °С) і

сильний (від –6 до –8 °С). Така стандартизація заморозків дозволяє певною мірою порівнювати результати різних дослідів.

При побудові температурних кривих заморозків приймаються до уваги ті обставини, що важливим моментом є не тільки сила і тривалість заморозку, але і швидкість зниження і підвищення температури при цьому.

У результаті аналізу термограм весняних заморозків у природі за ряд років установлено, що різкий спад температури перед заморозком, відбувається о 19-20 годині. Період зниження температури від переходу через нуль до самої мінімальної складає близько 5 год. Найбільшої сили заморозок досягає перед сходом Сонця, біля 4–5 год. ранку. Підвищення температури ранком йде приблизно в два рази швидше, ніж зниження. На термограмах заморозків не завжди є відрізки, що відповідають виділенню тепла при конденсації вологи повітря, тому що у весняний період вологовміст повітря низький.

З метою дотримання єдиної закономірності ходу заморозків різної інтенсивності, криві програм штучних заморозків побудовані за законом охолодження однорідного тіла і досить добре співпадають з термограмами природних заморозків навіть у тих випадках, коли в ході природного заморозку спостерігалося короткочасне підвищення температури. При моделюванні заморозку, час початку зниження температури повітря програмується на 20 годину., мінімальна температура – на 5 годину, час припинення заморозку – на 7-8 год. Відповідно до природного ходу заморозку, швидкість підвищення температури від мінімальної в два рази вище, ніж швидкість зниження. При легкому заморозку тривалість заморозку від 0 до 0°С дорівнює 4 год., при заморозку середньої інтенсивності його тривалість складає 6-7 год., а при сильному заморозку вона буде дорівнює 8 год.

За теоретичною кривою програми заморозку будується крива програм на діаграмному диску приладу і по ній виготовляється лекало. Схема автоматичного регулювання відтворює хід заморозку в камері, заданий лекалом, з високим ступенем точності. Збіжність термограми в камері з теоретично побудованою програмою залежить від точності виготовлення лекала (рис. 6.3).

Вегетаційні посудини з рослинами встановлюються в камері заморозків до 20 год. У цей час температура повітря в камері близька до зовнішньої. О 20 годині камера закривається і включається система автоматичного регулювання. Після виконання програми заморозку, о 7-8 год., коли температура повітря в камері відповідно до програми вже буде вище 0°С і практично близька до зовнішньої, посудини з рослинами виносяться з камери і встановлюються за схемою досліду або в кореневі термостати, або у вегетаційний будиночок.

Контроль температури в камері під час заморозку дистанційний.

Спеціальні перемикачі на щиті керування камери дозволяють у разі потреби перейти на ручне керування ходом заморозку. Особлива увага звертається на утеплення вегетаційних посудин при заморозках. Температура ґрунту в центрі неутепленої посудини може знизитися нижче 0°С, і заморозку піддадуться не тільки надземні, але і підземні органи рослин, чого в природних умовах, як правило, не буває. Утеплення посудин досягається шляхом установки їх у дерев'яні шухляди і заповнення проміжків між ними утеплювачем.

У зимовий час можливе використання камери заморозків як вегетаційної. У ній підвішується панель з 20-ма лампами ВР-40 і встановлюється стелаж для рослин. Легка розбірна перегородка з дверцями відокремлює в камері тамбур. Така перебудова дозволяє при створенні заморозку витримувати рослини в строго контрольованих умовах і використовувати камеру заморозків як вегетаційну камеру з програмним регулюванням температури в широких межах. Пристрій тамбура дає можливість входити в камеру для догляду і спостереження за рослинами без порушення режиму роботи.

Програма включення і вимикання світла наноситься на діаграмний диск моста ЕМЛ-212 і зчитується фотоелектричним реле. Контроль температури повітря, ґрунту й органів рослин проводиться з точністю до ± 0,25°С за допомогою моста. Як високочутливий термометр використовується самопис Н-373/1 з термопарами мідь-константан із проводу діаметром 0,06-0,1 мм з емалевою ізоляцією. Міст має перемикач на 24 положення, тому є можливість міряти і записувати температури послідовно в 24 точках. Для вимірювання температури органів рослини термопари вживляються в них, а на вегетаційній посудині кріпиться штепсельний перемикач, до якого підключається кабель від перемикача. Вимірювання температури проводиться диференціальним методом. «Холодні» спаї або термостуються в таненому льоді, або температура органів рослини міряється відносно температури повітря і «холодні» спаї встановлюються в закритому екрані.

З константану виготовлені тільки диференціальні електроди, а вивідні електроди і жили кабелю виготовлені з міді, тому погрішності термоелектричного походження виявляються мінімальними. Завдяки високому вхідному опору приладу, є можливість застосування кабелю великої довжини, а опір провідників при вимірюванні температури повітря і перехідні опори перемикача практично не впливають на результат.

6.1.3 Застосування видозмінених вегетаційних посудин зі знімним дном

При натурному моделюванні впливу екстремальних явищ на

рослини озимих культур А.І. Коровіним запропоновано застосовувати видозмінені вегетаційні посудини – ящики зі знімним дном. Схема пристрою такого ящика приводиться на рис. 6.4.

Восени ящики набиваються ґрунтом так само, як вегетаційні посудини. Якщо потрібно, у ґрунт вносяться добрива, визначається поливна маса кожного ящика; якщо необхідно, дослід проводиться при заданій вологості ґрунту. Після посіву, якщо в цьому є необхідність, ящики встановлюються в польових умовах чи у вегетаційних будиночках. З цього моменту можна регулювати режим вологості, температури і світла в найрізноманітніших сполученнях. У потрібний час можна створювати перезволоження, посуху, високі і низькі температури, заморозки і морози. Рослини в ящиках зимують на спеціально обладнаній піщаній площадці. Схема такої площадки приводиться на рис. 6.5.

Після всіх заданих впливів модельованих метеорологічних факторів осені, зими і весни ящики до моменту активної вегетації переносяться в поле, знімається шар ґрунту на висоту ящика і ящик ставиться на місце, де рослини продовжують розвиватися до дозрівання. При цьому дно в кожного ящика знімають і корені рослин надалі заглиблюються в ґрунт поля. Іншими словами, рослини розвиваються надалі в природних польових умовах. При бажанні можна зняти і стінки ящика, залишивши тільки ґрунт із рослинами для подальшої вегетації в природних польових умовах.

Зупинимося на деяких моментах проведення вегетаційних дослідів з озимими. Мається на увазі організація піщаної площадки для перезимівлі рослин у посудинах і ящиках. У період, коли активна вегетація озимих, а також і багаторічних трав закінчиться (стійкий перехід температури повітря від +5 до 0 °С), посудини або ящики з рослинами переміщаються на піщану площадку (див. рис. 6.5). Остання представляє собою ділянку землі прямокутної форми, що покрита рівним шаром піску 35-40 см. Місце для площадки важливо вибрати так, щоб воно рівномірно покривалося снігом, щоб не було здування чи нанесення снігу; площадка повинна бути на сухому місці.

У піску площадки викопується траншея на глибину ґрунту в посудинах чи ящиках. Потім посудини або ящики з рослинами рівними рядами ставляться на дно траншеї і вирівнюються. Усе тут ставиться так само, як у вегетаційному будиночку. Потім проміжки між посудинами засипаються піском, який ущільнюється і доводиться до рівня ґрунту в посудинах чи ящиках (рис. 6.6). У такому виді посудини чи ящики залишаються до весни. При розміщенні посудин чи ящиків враховуються можливості проморожування рослин взимку за допомогою пересувних польових камер. Для цього розміщення посудин і ящиків планується таким чином, щоб була можливість установлення польової пересувної

низькотемпературної камери (вона ж камера відлиг, загартувань). Ящики з рослинами можуть ставитися один до одного впритул.

Якщо рослини, що протягом зими проморожуються в стаціонарних або низькотемпературних камерах, піддаються іншим впливам, то вони можуть виноситись з площадки і після необхідного впливу повертатися на місце до весни. Навесні ж вони переносяться в поле і після знімання дна встановлюються в поле до кінця вегетації, щоб довести рослини до дозрівання і визначити кількість і якість врожаю.

Для цієї мети на полі, де передбачається довести дослід до кінця, по ширині ящиків виймається шар верхнього ґрунту на глибину шару ґрунту в ящиках. Потім береться ящик з рослинами і встановлюється у виїмку ґрунту. Дно ящика знімається і моноліт ґрунту з рослинами залишається у виїмці. Стінки шухляди теж знімаються. Зазори, що утворилися між стінками прибраного ящика і нерівностями викопаної виїмки, засипаються. Після цього ділянку поливають для того, щоб моноліт ґрунту з рослинами і засипаним ґрунтом у зазори щільно прилягли до дна і стінок виїмки. Надалі рослини продовжують вегетувати вже в полі. В умовах дрібноділяночного польового досліду на крайніх варіантах створюються защитки.

6.2 Регулювання термічного режиму в період вегетації рослин

6.2.1 Термовегетаційні будиночки і камери

Термовегетаційні будиночки на джерельній воді. Принцип роботи установок, що створюють зниження температури в зоні коренів, полягає в тому, що до ванн, у які ставлять посудини з рослинами, підводиться джерельна вода (влітку вона має температуру близько 4-5 °С). Пропускаючи її через ванни, можна створювати різноманітні термічні умови.

Джерельна вода надходить у водопровідну розподільну трубу, від неї відходять труби меншого діаметра, по яких вода подається у ванни, розташовані у будиночку, заповнюючи їх знизу до визначеного рівня, і зливається у відвідний жолоб. У ваннах на особливих решітчастих підставках містяться вегетаційні посудини з ґрунтом. Температура ґрунту в посудині дорівнює температурі води, або в особливо теплі дні, трохи вище (на 1-1,5 °С). Обмін води відбувається за 15-20 хв. Пристрій ванни показаний на рис. 6.7. Для створення градацій температур ґрунту в посудинах, ванну розділяють на кілька відсіків з різною проточністю води.

Для розділення синтетичної і поглинальної функції коренів – здатності рослин засвоювати ті чи інші елементи мінерального живлення, внесені у вигляді різних добрив, при знижених температурах –

сконструйовані посудини-вершники за принципом роздільного живлення. Посудина-вершник (рис. 6.8) складається з двох посудин, з'єднаних разом у верхній частині. Він ставиться на гостро затесаний борт спеціальної ванни. В результаті одна частина посудини знаходиться у ванні, інша – на повітрі. Частина посудини, що знаходиться у ванні і безперервно обмивається холодною джерельною водою, має низьку температуру ґрунту, інша частина – температуру повітря.

Рослини висаджують у виді паростків таким чином, щоб на холодну і теплу частину посудини приходилася однакова кількість коренів. Вгорі простір між частинами посудин відокремлюється перегородкою з парафінованої марлі, складеної вчетверо. Для рослин у перегородці робляться виїмки. В залежності від мети досліду набір елементів ґрунтового живлення можна по-різному розподіляти між холодною і теплою частинами посудин. Крім того, можна вивчати роль прогрітих коренів на здатності рослин поглинати мінеральне живлення з холодного ґрунту.

Для диференційованого охолодження верхньої частини коренів і вузлів кущіння і для вивчення їх ролі в житті рослини застосовується метод трубок-завитків. Суть полягає в тому, що трубка діаметром 1 см скручується в спіраль у виді змійовика в одній площині. Ця спіраль поміщається у вегетаційну посудину на рівні вузлів кущіння рослин. Кінці трубки, загинаючи, виходять із посудини. До них прикріплюють гумові шланги, які підводять і відводять воду. Пропускаючи воду через трубки-завитки, можна охолоджувати вузли кущіння, не охолоджуючи кореневі кінчики. Посів насіння проводиться між витками трубки-завитка.

Описані методи створення низьких температур ґрунту, є простими, надійними і безвідмовними, але за їх допомогою не можна встановлювати контрольоване підвищення температури.

Поряд з ваннами для одержання понижених температур, обладнуються ванни для одержання контрольованих підвищених температур ґрунту. Ванни виготовляються з оцинкованого заліза і мають такий же розмір, як і ванни для одержання понижених температур (400×80×25 см). Щоб надати строго визначене положення і стійкість, залізна ванна вставляється в дерев'яну. Дно залізної ванни ставиться на ребра жорсткості, в проміжках між якими улаштовані камери, облицьовані цеглою. У камери поміщаються електричні підігрівники, які складаються з декількох електроламп, змонтованих на залізній підставці. Ставлячи лампи різної потужності, можна легко забезпечувати потрібну температуру та рівномірно нагрівати ванни, що важко досягти при інших способах електронагріву. Подача холодної води регулюється особливим пристроєм, що пускає її лише у випадку перегріву. При підігріві води з дна ванни одночасно в багатьох точках відбувається перемішування верхніх шарів,

що прохолоджуються, з підігрітими нижніми, у результаті досягається рівномірне нагрівання.

Удосконалений метод одержання різних температур ґрунту дозволяє протягом усього періоду вегетації рослин мати температури в діапазоні від 6 до 25°С і вище в залежності від мети експерименту.

Термовегетаційні камери на криничній і водопровідній воді.

Термовегетаційна камера, що створена на експериментальній базі Сибірського інституту фізіології і біохімії рослин СВ АН СРСР, змонтована на дерев'яній площадці, яка служить нижньою підлогою, і оснащена окремим входом. Розмір камери 2,5×2,6 м при висоті з лицьової сторони 2,5 м, а з протилежної – 2 м; об'єм камери близько 15 м^3. Усередині камери на висоті 20 см від нижньої підлоги є друга решітчаста підлога з відстанню між дошками 2 см. Подвійна підлога призначена для регулювання в камері температури повітря, що подається через отвори другої підлоги. Вздовж бокових стін камери встановлені по дві дерев'яні ванни-термостати, покриті усередині оцинкованим залізом.

Застосовується три типи ванн: з однією, двох і трьох секцій. У кожній секції можна підтримувати необхідну задану температуру. У період проведення дослідів ванни заповнюються водопровідною або криничною водою. Температура ґрунту в посудинах регулюється водою, що має температуру близько 4 °С; вона подається у ванни-термостати по теплоізольованих трубах з водонапірного бака ємністю 10 м^3. Вегетаційні посудини у ваннах, що мають електропідігрівання, установлюються на дерев'яних решітках таким чином, щоб верхня частина їх була на 1 см вище ванни, а рівень води у ванні – на 1-1,5 см вище рівня ґрунту. Перше зберігає посудини від затоплення, а друге знижує можливість нагрівання верхнього шару ґрунту. Крім посудин розміром 20×25 см, застосовуються вузькі посудини 15×25 см, у яких легше підтримувати стабільну температуру ґрунту. У дослідах температура ґрунту на глибині 5 см вдень вище температури води на 1-2 °С, а вночі і в похмурі дні температура ґрунту в посудинах і води у ваннах практично однакова.

Наявність різних типів ванн-термостатів дають можливість проводити досліди з великим набором температур ґрунту. Застосування найпростіших і доступних елементів автоматики в термовегетаційній камері дозволяє створювати регульовані термічні умови в межах від 4-5 до 30 °С і вище.

Потрібна температура ґрунту підтримується протягом доби і протягом усієї вегетації рослин, а температура повітря – тільки в нічний час. Всі автоматичні прилади змонтовані на панелі, яка розташована за камерою.

Зміна температури ґрунту в посудинах досягається шляхом

регулювання потоку холодної води за допомогою ручного чи електромагнітного вентиля або підігрівом води в термостатах за допомогою електропідігрівників, вмонтованих у нижніх частинах ванн. Установлена ручним вентилем температура води ванни-термостата надалі підтримується автоматично за допомогою терморегулятора, який складається з біметалічного датчика температури, що знаходиться в термостаті, і проміжного реле.

Температура повітря в камері підтримується на заданому рівні за допомогою найпростішого кондиціонера, що складається з калорифера (рис. 6.9), вентилятора і електропідігрівника, змонтованого під рішітчастою підлогою камери. Терморегулятор складається з біметалічного датчика, встановленого в камері, і проміжного реле. При підвищенні температури вище заданої терморегулятор включає вентилятор, зовнішнє повітря всмоктується крізь калорифер, трубки якого охолоджуються холодною водою, і через рішітчасту підлогу попадає в камеру. При зниженні температури в камері терморегулятор включає електропідігрівання, і тепле повітря за рахунок природної конвекції надходить у камеру. З камери повітря виходить через сітчасті вікна, розташовані у верхній частині лицьової сторони камери.

6.2.2 Пересувні вегетаційні будиночки

Якщо щорічно рослини тих самих сортів, у ту ж саму фазу піддавати дії весняного заморозку однієї і тієї ж сили і тривалості, то заморозкостійкість рослин буде різна. В один рік рослини можуть перенести заморозок без помітних ушкоджень, в інший – ушкодитися, а в третій – загинути. Така мінливість стійкості рослин до заморозків пояснюється впливом зовнішніх умов до і після заморозку. Вирішальними в цьому випадку будуть умови погоди, що складаються за 3-4 дні до заморозку та у наступні 1-2 дні.

Для одержання однакових і порівнюваних результатів про вплив заморозків на різні сорти рослин щорічно, необхідно створювати однакові умови зовнішнього середовища до і після заморозку. Необхідно регулювати температуру повітря і вологість ґрунту, а ще краще температуру і вологість ґрунту і повітря, а також світлові умови. Регулювання температури повітря і вологості ґрунту в період вегетації рослин може бути досягнуте за допомогою пересувних вегетаційних будиночків з регульованою температурою повітря. Вологість ґрунту регулюється поливом рослин у посудинах чи ящиках.

Для проведення вегетаційних дослідів з рослинами А.І. Коровіним сконструйовані пересувні вегетаційні будиночки з поліетиленової плівки. У цих будиночках вегетаційні посудини з рослинами містяться не на

рухливих вагонетках, а на стаціонарних стелажах, що упродовж дослідів залишаються на місці. Пересуваються не вагонетки, а сам вегетаційний будиночок.

Переміщення будиночків, а не вагонеток з рослинами обумовлене тим, що в цьому випадку можна автономно регулювати температуру ґрунту і повітря. Температура ґрунту регулюється за допомогою кореневих термостатів, а температура повітря – за допомогою холодильних установок АР-4 і калориферів.

Пересувні вегетаційні будиночки з поліетиленової плівки дозволяють при проведенні досліду регулювати температуру ґрунту і повітря, а також у них можна проводити звичайні вегетаційні досліди, коли необхідно точно регулювати вологість ґрунту.

Принципова схема пересувного вегетаційного будиночка приводиться на рис. 6.10. Будиночок має розміри 10×3×2,5 м. Каркас із двосхилим дахом виконаний зі сталевого профільованого прокату (кутика) і обтягнутий поліетиленовою плівкою. У основи будиночка є ролики на шарикопідшипниках, на яких він переміщається по направних сталевих трубах-рельсах чи швелерних рейках, які покладені на поверхні ґрунту й укріплені на вбитих у землю металевих штирях.

У будиночках без регулювання температури ґрунту одна з торцевих стінок виконана у виді двостворних дверей. Створки їх розкриваються в момент скочування чи накочування будиночка. Скочується він вдень у гарну погоду, коли не треба вкривати рослини. Накочується, коли в цьому з'являється необхідність. Будиночок відмінно захищає рослини від дощу, вітру, легко зрушується з місця. Він з успіхом заміняє звичайний вегетаційний будиночок зі скла. У ньому кращий світловий режим, за рахунок кращого проходження через плівку ультрафіолетових променів у порівнянні зі склом, ніколи не буває капелі, яка можлива в звичайних будиночках, особливо під час дощу після жаркої сухої погоди. На двох стелажах розміщається 200–250 вегетаційних посудин діаметром 20 см. У будиночках з регульованою температурою повітря в торцевих частинах умонтовані холодильні установки АР-4 і електрокалорифер.

На ніч і у непогоду будиночки накочуються і зупиняються точно у фіксованому стані так, що зазори між стінками будиночків і холодильною установкою щільно закриваються.

У період експлуатації, вивчається температурний і світловий режим будиночків у ясну і похмуру погоду. Температура реєструється за допомогою метеорологічних термометрів і термографів М-16.. Для усунення погрішностей вимірювань температури повітря у вегетаційних будиночках термографом М-16 застосовується екран з жерсті, покритий білою олійною фарбою. На спеціальних підставках у середній частині стелажів на висоті 70 см установлюються самописці з орієнтацією

приймачів на північ. Паралельно два рази на добу ведуться спостереження за температурою за допомогою метеорологічних термометрів.

Вивчення ведеться без регулювання температури і з її регулюванням за допомогою холодильної установки АР-4 та електрокалориферів у похмуру і ясну погоду. Узагальнений вид кривих ходу температури усередині будиночка в похмуру і ясну погоду представлений на рис. 6.11. Як видно з кривих добового ходу температур усередині будиночка і на відкритій площадці, різниця в температурі незначна, особливо в похмуру погоду й у нічні години. У ясну погоду різниця в температурах між відкритою площадкою та усередині будиночка, закритого цілодобово, може досягти 20 °С (рис. 6.11). При накочуванні будиночка о 17 год. відбувається швидке і дуже небажане підвищення температури. Тому в ясну погоду накочування будиночків варто проводити не раніш 20 год.

Визначення ступеня зниження інтенсивності променистого потоку у вегетаційних будиночках в порівнянні з відкритою ділянкою показує, що хід радіації у вегетаційному будиночку наслідує її зміну на відкритому повітрі. У результаті тіньових ефектів плівки, а також непрозорих елементів каркаса величина сумарної радіації усередині будиночка знижується максимально до 30 % у порівнянні з відкритою ділянкою.

Величина розсіяної радіації усередині будиночка дорівнює 59 %, у той час як на відкритій ділянці вона складає 22 % загального потоку. Інтенсивність фотосинтетично активної радіації у будиночку складає 47 % загального потоку, на відкритій ділянці – 52 %.

Головне достоїнство вегетаційних будиночків із плівки полягає в тім, що в них можна точно регулювати температуру повітря в нічні часи і в похмурі дні, знижувати на 3–4°С або підвищувати на 4–5°С у порівнянні з природним її ходом у ясні дні. Для точного регулювання температури в ясні сонячні дні необхідно збільшити потужність холодильних установок, або зменшити об'єм будиночків.

Як восени, так і навесні вдається за допомогою будиночків створити «холодну» і «теплу» осінь, «холодну» і «теплу» весну тривалістю від 32 до 45 днів. Поєднання дослідів, проведених у вегетаційних будиночках з регульованою температурою і у низькотемпературних камерах, відкриває можливість експериментального вивчення ролі температурного фактора при перезимівлі та врожайності озимих культур, багаторічних трав, плодово-ягідних культур у найрізноманітніших аспектах.

6.3 Газова система для вимірювання транспірації і CO_2 -обміну

Відомо, що в умовах водного стресу видимий баланс CO_2 рослини зменшується, а це приводить до зниження продуктивності РП. Для вивчення газо- і вологообміну рослин у широкому діапазоні умов

навколишнього середовища, у тому числі в умовах повітряної чи ґрунтової посухи, застосовуються чуттєві оптико-акустичні газоаналізатори.

На рис. 6.12 приведена схема відкритої газової системи з термостованою листовою камерою для виміру транспірації і CO_2-обміну окремих листків. Особливістю листової камери є те, що одна сторона листка (звичайно безустячкова) знаходиться в безпосередньому контакті з термостатованим вікном. Це забезпечує практично постійну температуру листка в широкому діапазоні зміни інших умов середовища. Газова система дозволяє створити над листком швидкі зміни концентрації CO_2, які необхідні для визначення провідності мезофіла.

Набір замінних оптичних фільтрів дозволяє швидко змінювати інтенсивність і спектральний склад світла. На вхід камери подається сухе повітря, тому вологість повітря над листком змінюється в широких межах у залежності від швидкості струму повітря через камеру та інтенсивності транспірації.

Цей недолік усунутий у трьохканальній газовій системі, де листкова камера може підключатися до кожного з трьох каналів, що мають різні концентрації CO_2 і вологості повітря. Кожен канал має датчик вологості, який настроєний на вологість свого каналу. Датчики вологості, перемикач каналів і листкова камера складають компактний єдиний термостатований блок, що забезпечує швидку реакцію датчиків на зміну вологості повітря і концентрації CO_2 у камері. До каналів підключається газоаналізатор для реєстрації CO_2-обміну.

У корпус листкової камери вмонтований мініатюрний інфрачервоний радіаційний термометр для безконтактної реєстрації температури листка, а також джерело і датчик β-випромінювання для реєстрації водовмісткості листка (рис. 6.13, а). Листкова камера оснащена автономним джерелом світла і поміщена в кондиціонер, що дозволяє чи підтримувати, чи різко змінювати умови середовища (температуру, вологість повітря, хмарність) над всіма іншими частинами рослини (рис. 6.13, б).

Отже, уся система дозволяє реєструвати швидкі зміни транспірації і CO_2-обміну, температури і водовмісту окремих листків при раптовій зміні умов середовища над листком або усією рослиною. Крім вивчення стійкості провідності устячок і мезофіла до водного дефіциту в ґрунті, система зручна для дослідження так названої прямої реакції устячок на вологість повітря і взаємозв'язку цієї реакції з реакцією устячок на концентрацію CO_2.

6.4. Фітотрони

Комплексне дослідження фізіологічних процесів цілого рослинного

організму, що включає роздільне вимірювання показників надземної частини і кореневої системи, а також реєстрацію основних параметрів зовнішнього середовища, є єдиним повним науковим підходом до вивчення життєдіяльності рослини і їхньої екології. Систематизація й інтеграція накопичених даних може бути виконана в рамках математичної моделі продуційного процесу рослин. Така теоретична модель вже в найближчому майбутньому зможе стати основою практичного землеробства, що дозволить відповідно до метеорологічних умов завчасно планувати агротехнічні роботи в полі, оцінювати і прогнозувати стан і врожайність сільськогосподарських культур.

Постановка цієї важливої проблеми можлива лише на основі тісної спільної роботи фізіолога, інженера і математика.

В даний час найбільш вузьке місце в розвитку моделі продуційного процесу полягає не у відставанні математичної сторони проблеми й обчислювальної техніки, а в недосконалості наших знань про фізіологічні процеси в рослині, у відсутності досить коректних багатофакторних експериментів, що дають кількісну інформацію для подальшого удосконалення моделей.

Методичною основою для вирішення поставленої задачі є безупинна сінхронна реєстрація можливо більшої кількості фізіологічних процесів (фотосинтезу, дихання, транспірації, поглинання і пересування води і мінеральних речовин, теплорегуляції та ін.) у різних умовах зовнішнього середовища протягом онтогенезу рослин. Використовувані методи не повинні порушувати життєдіяльності рослини, його прямих і зворотних зв'язків із середовищем, а багатопозиційність системи не повинна затягувати збір й обробку одержуваної інформації.

6.4.1. Мікрофітотрон конструкції АФІ

У лабораторії біокібернетики Агрофізичного інституту (АФІ) під керівництвом В.Г. Карманова на основі мікротерморезісторної техніки розроблений комплекс оригінальних датчиків температури повітря і рослини, транспірації листя і відносної швидкості руху рідини по стеблу, відносної й абсолютної вологості повітря та ін. У поєднанні з промисловою газоаналітичною апаратурою (на CO_2 і O_2) і селективними датчиками концентрації іонів у мінеральному розчині (NO_3 , K^+, Ca^{++} та ін.) цей комплекс дозволяє здійснити одночасну автоматичну реєстрацію основних фізіологічних процесів у рослині і тим самим створити передумови для більш глибокого проникнення в механізм їхнього взаємозв'язку.

Центральне місце в такій автоматизованій системі приділяється біологічній стороні, тобто рослині, яка поміщається у фітокамеру з

контрольованим режимом (фітотрон). В залежності від задач, об'єктів та умов досліджень використовуються фітотрони всіляких конструкцій.

Розроблено два типи мікрофітотронів – на одну і на три рослини. Загальною рисою обох конструкцій є наявність двох камер: для надземної частини рослин і для кореневої системи. Для реєстрації параметрів середовища і рослини в камери мікрофітотронів через герметичне електричне розняття вводяться мікротерморезісторні датчики температури повітря, листя, стебел, коренів, відносної вологості повітря і швидкості руху рідини по стеблу. Мікрофітотрон на три рослини складається з камер, які герметично стикуються: верхньої (знімної), для надземної частини рослин, і нижньої, для кореневої системи.

Оригінальність конструкції камери для коренів полягає у використанні для середовища, де мешкає коренева система, еластичної пористої пластини з поролвініла чи мілпласта товщиною 1 мм, зануреної нижнім кінцем у живильний розчин, рівень якого (3-4 см від дна), автоматично підтримується за допомогою поплавкового клапана. Плівкова модель ґрунту, у порівнянні з водяною, піщаною і керамзитовою, забезпечує для кореневої системи рослин більш сприятливий водний, повітряний і мінеральний режим вирощування, крім процесів анаеробіозу – знижуючи накопичення токсичних продуктів біогенного руйнування і сповільнюючи старіння коренів.

Специфіка формування кореневої системи при аерогідролітовому способі вирощування рослин дозволяє максимально скоротити обсяг прикореневої зони і тим самим знизити інерційність процесу вирівнювання газового складу в об'ємі нижньої камери.

Камера для кореневої системи (320×220×220 мм) термостатована, має подвійні стінки з оргскла товщиною 12-14 мм і світлонепроникне зовнішнє покриття. Спеціальна конструкція внутрішньої частини камери скорочує об'єм до 2 дм^3, що при прийнятих в експерименті швидкостях протягання повітря через кореневу камеру (30-60 л/год.) дозволяє фіксувати не тільки стаціонарні значення, але і відносно швидкі (5-10 хв) зміни інтенсивності кореневого дихання.

Штуцери газового тракту і мінерального живлення кореневої камери розташовуються на передній (знімній) і задній кришках. Герметизація передньої кришки забезпечується прошарком губчатої гуми і гвинтовим затиском. Оглядові вікна на бокових стінках корпуса нижньої камери дають можливість спостерігати за розвитком кореневих систем рослин та рівнем живильного розчину. У робочому стані вікна закриті світлонепроникними заслінками. Рослини в камеру для коренів поміщаються через отвори у верхній кришці.

Верхня камера (300×200×260 мм, об'єм 11 дм^2) виконана з оргскла

товщиною 12 мм і розрахована на три рослини висотою до 25 см і загальною площею листкової поверхні до 7-8 дм^2. Вмонтований у камеру профільований радіатор, по якому циркулює вода з ультратермостата, дозволяє регулювати температуру повітря верхньої камери від 15 до 40°С. Рослини освітлюються лампами ДРЛФ-400 чи ЗН-7. Керування світловим режимом автоматизовано за допомогою програмного реле часу РВМ-2. Довгохвильова радіація (1200 нм) поглинається проточною водою (шар 4-5 см) у кюветі, установленому на верхній кришці камери. Автоматичне включення руху води через кювет з одночасним включенням світла здійснюється при допомозі спеціальних клапанів. Для підведення води і повітря на бокових стінках верхньої камери передбачені шість штуцерів. На задній стінці камери встановлений мікровентилятор із приводом від електродвигуна постійного струму ДПМ-30, що створює вітровий потік з лінійною швидкістю 3 м/с.

Герметизація стебла досягається за допомогою сальників, насичених сумішшю воску з вазеліном, і спеціального затискного пристрою в кришці камери, що представляє систему рухливого і нерухомого півкілець, пришліфованих до основи, які щільно стикуються один з одним за допомогою двох штирів із гвинтовою нарізкою.

За винятком деяких конструктивних відмінностей, у мікрофітотроні на одну рослину камери побудовані за тим же типом, що і камери у фітотроні на три рослини, але розташовуються роздільно так, що стебло герметизується двічі - на виході з кореневої камери і на вході камери для надземної частини. Верхня камера (160×160×190 мм) має відкидну передню стінку, що кріпиться на шарнірах. На задній стінці камери вмонтований дротовий нагрівач, зв'язаний із двопозиційною системою регулювання температури. Стебло рослини вводиться усередину верхньої камери через круглий отвір у дні. Для роботи з високостебельними культурами, наприклад із пшеницею, передбачене збільшення висоти камери за рахунок тубуса з оргскла, що закріплюється за допомогою різьбового кільця замість знімної частини верхньої кришки. Знімна частина пристрою кореневої камери (80×110×150 мм) дозволяє відповідно до задач досліду вирощувати рослини не тільки аерогідролітовим способом (на плівці), але й у водному, керамзитовому і ґрунтовому середовищах.

Схема функціонування мікрофітотрона приведена на рис.6.14. Де: НВ - зовнішнє повітря; БЕ - буферна ємність; Ml і М2 -маностати; Р - ротаметри; ВК і КК - верхня і коренева камера мікрофітотрона; ГР1 і ГР2 - газові реле; АФИР - автоматичний фізіолог рослин; 1-5 – мікротерморезисторні датчики для вимірювання: температури повітря $\Theta_п$; листів $\Theta_л$; кореневої системи $\Theta_к$, вологості повітря φ і швидкості руху

рідини по стеблу (РДЖ); 6-9 – блок селективних електродів для вимірювання концентрації *K, Ca*, NO_3 і *pH*; ПРЗ, ПР7 і МК2 - побудники витрати газу; АСК - аскарит; ОА-550І - оптико-акустичні газоаналізатори; Л - джерело світла.

Інтенсивність газообміну (мг·CO_2/росл. год.) визначається за допомогою оптико-акустичних газоаналізаторів ОА-550І у відкритій системі вимірюванням абсолютних значень концентрації CO_2 на вході і виході камер.

Необхідна багатоканальність роботи газоаналітичної установки з двома мікрофітотронами (робочим і контрольним) досягається відповідною комутацією газових каналів (виходи камер, контроль нуля і зовнішнього повітря) за допомогою автоматичних газових перемикачів на основі електромагнітних реле (типу РГ 100). Обидва перемикачі (на чотири канали кожний) працюють синхронно. При подачі електричного сигналу на обмотку керування якого-небудь реле якорем пережимається еластична гумова трубка, перекриваючи відповідний канал. Порядок включення каналів і тривалість їхньої роботи задаються командним приладом типу КЕП-12У. У системі випробуваний наступний режим роботи газових перемикачів: періодичність підключення виходів камер 10 хв, контролю нуля і зовнішнього повітря – 40 хв; тривалість роботи кожного каналу в циклі 5 хв. Позитивною властивістю такого газового перемикача є значна гнучкість програми при широкому діапазоні тривалості роботи будь-якого каналу.

Швидкість протягання повітря через камери встановлюється регулюючими вентилями в межах 100-150 л/год. при вимірюванні фотосинтезу і 30-60 л/год. при дослідженні інтенсивності дихання кореневої системи.

На вхід верхньої камери подається повітря, осушене за допомогою безводного хлористого кальцію. На основі показань датчика, відносної швидкості руху рідини по стеблу, встановленого в основи стебла, і датчика відносної вологості повітря, вмонтованого на виході верхньої камери, з урахуванням температури, тиску і витрати повітря в камері розраховується інтенсивність транспірації. Використання методу безупинної реєстрації швидкості потоку вода в інтактних рослинах дозволяє оцінити дійсну динаміку їх водного обміну при цілком задовільному збігу показників інтенсивності транспірації і швидкості руху рідини по стеблу. Підтримка відносної вологості повітря у верхній камері на сприятливому для рослин рівні (75-85 %) при збільшенні їхньої листкової поверхні в другу половину вегетації вимагає у світловий період збільшення швидкості прокачування повітря до 220–250 л/год.

Комплексність фізіологічних досліджень може бути істотно доповнена включенням блоку для контролю мінерального живлення

рослин. Динаміка поглинання елементів мінерального живлення визначається по зменшенню їх у живильному розчині за допомогою іоноселективних електродів ЕМ-*К*-01 (на *Ка),* ЕМ-*Са*-01 (на *Са*) і ЕМ-NO_3-01 (на NO_3), контроль кислотності середовища здійснюється скляним електродом ЕСЛ-63-07. Іоноселективні електроди розміщаються в спеціальних чарунках при постійному контакті з мінеральним розчином. Зміна живильного розчину в кореневих камерах (однократний розчин Кнопа з додаванням хелатів мікроелементів) проводиться один раз за дві доби.

Автоматизація біологічного експерименту, оснащення його точними і високочутливими приладами хоча і складає найважливішу умову сучасного дослідження, однак, є лише засобом, а не самоціллю. Біологічний об'єкт, у даному випадку рослина, – це той центр, на який повинна бути звернена увага дослідників. Правильний вибір об'єкта, науково обґрунтована схема експерименту, висока точність і коректність його проведення забезпечать одержання корисної наукової інформації.

Експлуатація описаних вище мікрофітотронів і зв'язаної з ними апаратури представляє значні методичні труднощі і вимагає виконання тонких і трудомістких операцій. Це, насамперед, стосується роботи з піддослідними рослинами.

Паростки, вирощені протягом декількох днів у чашках Петрі чи в гідропонній культурі, варто приживити на пористій пластині з поровініла, приймаючи міри для стабілізації їхнього водного режиму.

Наступним етапом роботи з рослинами є ізоляція надземної частини від підземної, що особливо важливо при щільному стикуванні верхньої і кореневої камер. Герметизацію можна виконувати, як тільки стебло достатньо зміцніє. При герметизації стебла не повинні бути ушкоджені тканини флоеми (при здавлюванні чи при використанні токсичних для рослин замазок) і повинна бути досягнута досить повна (перевірка на вакуум за допомогою манометра) ізоляція верхньої і кореневої камер одна від одної. Інакше отримані дані по газообміну надземної і кореневої частин рослин будуть спотворені.

Біометричний контроль за рослинами, розміщеними в мікрофітотроні, обмежується періодичним вимірюванням площі листя, висоти стебла і коефіцієнта кущіння у зернових культур. Необхідність реєстрації динаміки накопичення біомаси надземною частиною і коренями рослин протягом досліду, привела до створення спеціального пристрою для вирощування рослин, що імітує кореневу камеру мікрофітотрона. Ця камера-дублер являє собою ємність прямокутної форми (500×260×200 мм) з оргскла товщиною 10-12 мм. Верхня кришка такої камери складена з окремих планок з півперфораціями. При змиканні планок у кришці утворюються сім рядів отворів діаметром близько 10 мм кожен, по чотири

отвори в ряду. Під кожним рядом отворів закріплені поровінілові пластинки, опущені нижнім кінцем у живильний розчин Кнопа. Послідовне розсовування планок забезпечує часткову виїмку рослин у різні строки вегетації без ушкодження кореневої системи рослин, які залишаються. Камера має світлонепроникне покриття, забезпечена водомірним склом і штуцером для зливу розчину.

Камера-дублер і мікрофітотрон заповнюються рослинами одночасно. В кінці досліду експериментатор має криву накопичення сухої ваги рослинами в камері-дублері і дані про кінцеву вагу пагонів і коренів рослин з мікрофітотрона. Ці матеріали є основою для одержання ряду розрахункових величин, що характеризують досліджувані фізіологічні процеси.

Сучасна методологія проведення фізіологічних досліджень цілої неушкодженої рослини дозволяє вивчити добовий хід і спряженість процесів фотосинтезу, водообміну і мінерального живлення, дихання і терморегуляції надземних і підземних органів, дає можливість досконально простежити за характерною для живих об'єктів реакцією післядії факторів зовнішньої середовище. Отримані матеріали показують, що рівень фізіологічних процесів у рослинах визначається не тільки безпосереднім впливом навколишнього середовища в даний момент, але і передісторією вирощування об'єкта.

Інформаційна цінність подібних даних може бути істотно підвищена за рахунок доповнення системи автоматизованої реєстрації і керування мікрофітотрона інформаційно-обчислювальною системою первинної обробки експериментальних даних у режимі реального часу на основі мини- і макро-ЕВМ.

6.4.2. Експериментальні установки для вивчення транспірації рослин

Для вивчення транспірації рослин при комплексному впливі всіх основних факторів зовнішнього середовища застосовується спеціалізована експериментальна установка, схема якої показана на рис. 6.15.

Установка складається з кліматичної камери типу "Feutron" з корисним об'ємом 0,25 м^2, у якій регулюються і строго підтримуються на заданому рівні всі досліджувані параметри. Температура повітря в камері регулюється непрямим методом. У стінках камери є система каналів, у яких прокачується термостатована рідина. Це забезпечує рівномірність температури в об'ємі камери і швидкий перехід на заданий режим. Температура регулюється в межах від –20 до +90 °С і підтримується з точністю ±0,2 °С.

Вологість повітря в камері регулюється в діапазоні від 10 до 100%, при постійності температури точки роси ±0,5 °С, за допомогою хлористо-літієвих датчиків. Повітря в камеру надходить через зволожувач чи осушувач у залежності від необхідної вологості. Для перемішування повітря в камері служить вентилятор. Зміною його прохідного перетину на усмоктувальній стороні регулюється швидкість повітря в корисному об'ємі від 0 до 1,68 м/сек. На стелі камери є вікно з нагрівальним увіолевим склом, через яке освітлюється камера.

Основним якісним показником джерел штучного опромінення є їхня спектральна характеристика. Виходячи з цього, джерелом світла в камері є дугова ртутна лампа ДРФ-1000, спектр випромінювання якої близький до спектра поглинання сонячної енергії рослиною. Інтенсивність її випромінювання східчасто міняється за допомогою світлофільтрів. Світлофільтри виготовлені з дрібної бронзової сітки, чим забезпечується постійний спектр опромінення рослин.

Камера щільно закривається дверцятами, ізольованими пінопластом. У дверцятах змонтоване велике оглядове вікно з багаторядним заскленням. Таким чином, забезпечується проведення дослідів без порушення режиму в камері.

Робоча ділянка експериментальної установки (рис.6.16) виконана у вигляді з'єднання двох скляних трубок різного діаметра. У трубку 1, діаметром 16 мм, поміщається пучок рослин, а більш тонка мірна трубка 2, діаметром 1,5 мм, розташовується під кутом, що дає можливість значно підвищити точність реєстрації рівня рідини. Для запобігання випарування води з вільної поверхні, кінці трубок закриваються м'яким ущільнювачем. Для виключення помилки, внесеної розходженням у сумарній товщині різних пучків рослин, вони поміщаються в скляну трубку 3, діаметром 13,4 мм, ущільнюються біля основи стебла восковим пластиліном, для утворення між трубками 1 і 3 кільцеві зазори постійної товщини.

Для вимірювання температури листя, коренів і повітря використовуються мідь-константанові термопари. Термопарні проводи вводяться в камеру через отвір, розташований на стінці камери, яка ущільнюється азбестовим шнуром і поролоном.

Для термостатування коренів передбачена система, що складається з термостата типу ТС-16А, з'єднаного зі змійовиком, по якому прокачується термостатована рідина. Низькі температури в термостаті досягаються за допомогою холодильного агрегату типу ДХ-120. Сполучні труби ізолюються азбестовим шнуром. У змійовику міститься трубка 1 робочої ділянки. Для зменшення теплоприпливів, змійовик ізолюється пінопластом. Точність підтримки температури коренів складає ±0,5 °С.

Вимірювання транспірації.

Відомо, що в стаціонарному режимі вода, поглинена рослиною, з точністю до 0,2 %, виділяється в процесі транспірації. Тому інтенсивність транспірації можна визначити по поглинанню води коренями. Для цього пучок рослин поміщається в посудину 1 і по переміщенню водяного стовпа в трубці 2 (див. рис. 6.16) визначається обсяг води, поглиненої рослинами. Чутливість приладу регулюється зміною кута нахилу трубки 2. Об'єм поглиненої води розраховується так

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = s_1 b + s_2 a = a(s_1 \sin\alpha + s_2) = ka, \tag{6.1}$$

де s_1 – площа кільцевого зазору в трубці 1 визначається

$$s_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} - \frac{\pi d_3^2}{4} = \frac{\pi}{4}\left(d_1^2 - d_3^2\right), \tag{6.2}$$

де s_2 – площа поперечного переріза трубки 2;

k – постійна, залежна від геометричних характеристик приладу.

Для даної установки:

внутрішній діаметр трубки 1 – d_1 = 16 мм,

зовнішній діаметр трубки 3 – d_3 = 13,4 мм,

внутрішній діаметр трубки 2 – d_2 = 1.5 мм.

синус кута нахилу α – $sin\alpha$ = 0,13.

Постійна $k = 9{,}57 \cdot 10^{-6}$ м^2.

Тоді об'єм поглиненої коренями рослин рідини дорівнює $\Delta V = 9{,}57 \cdot 10^{-6}\, a$.

a – зміна рівня рідини в трубці 2 між двома вимірами за час τ.

Знаючи об'єм поглиненої рідини, час і площу листя S, можна визначити транспірацію рослин за формулою

$$T_r = \frac{\Delta V \rho}{S \cdot \tau}\ . \tag{6.3}$$

Точність вимірювання a складає ±0,25 мм.

Вимірювання площі листя. Площа листя визначається наприкінці кожного дослідного режиму за допомогою автоматичного площеміра типу ААМ-5. Точність вимірювання складає ±1 % на кожні 100 см^2 площі листя. У кожнім досліді визначається також ширина листкової пластинки.

Вимірювання температури. Температура листя, повітря і кореневого середовища визначається медь-константановими термопарами. Для визначення температури листя термопари кріпляться в декількох точках на верхній і нижній поверхнях листя. Для зменшення погрішності при

вимірюванні температури, термопара кріпиться до листка за допомогою затискача з м'яким ущільненням. При такому способі не травмується епідерміс листка і на показання термопар не впливає променистий теплообмін.

При визначенні температури повітря і коренів термопари розміщаються в декількох точках камери і посудини з водою, а потім виміри осереднюються. Погрішність визначення температури за паспортом приладу становить $\pm(1{,}5\cdot10^{-4}u + 0{,}4\Delta u)$, де u – показання приладу, мВ; Δu – ціна поділки приладу.

Вимірювання вологості повітря. Вологість повітря в камері визначається аспіраційним термометром типу 1470. Психрометр вводиться в камеру через спеціальний ущільнений отвір у стінці камери, що дозволяє робити виміри не порушуючи режиму роботи в камері. Потім за показниками сухого і змоченого термометрів, за допомогою психрометричних таблиць, визначається вологість повітря в камері. Ціна поділки термометра 0,1 °С.

Вимірювання швидкості повітряного потоку. Швидкість повітря в зоні листя визначається за допомогою кататермометра, що дозволяє визначати з високою точністю малі швидкості повітряного потоку. Визначення швидкості повітряного потоку проводиться по формулі:

$$\frac{H}{\Theta} = A + \frac{\beta \cdot W_o}{1 + kW_o} \ . \qquad (6.4)$$

де Θ – різниця між середньою температурою термометра під час досліду і температурою навколишнього середовища, що дорівнює: $\Theta = 36{,}5 - t$;

A, β, k – постійні, що приводяться в паспорті приладу;

H – середня охолоджуюча сила середовища визначається як

$$H = \Phi\ (t_1 - t_2)/\tau, \qquad (6.5)$$

де t_1 – температура термометра спочатку досліду; t_2 – температура термометра через проміжок часу τ.

В зв'язку з тим, що чисельне значення охолоджуючої сили залежить від температури кататермометра, приймається умова, щоб під час вимірювань середня температура була 36,5 °С, тобто охолодження можна проводити від t_1 = 40 °С до t_2 = 33°С або від t_1 = 38 °С до t_2 = 35 °С.

Розрахувавши відношення H/Θ, по формулі (6.8) визначається швидкість повітряного потоку. Максимальна погрішність при вимірюванні швидкості таким методом складає ±0,01 м/сек.

Вимірювання інтенсивності опромінення. Інтенсивність опромінення вимірюється сульфідно-кадмиієвими датчиками. Ці датчики мають високу стабільність і лінійну характеристику щодо інтенсивності опромінення 180 Вт/м^2. Інтенсивність міряється тільки в області фізіологічно активної радіації. Напруга на датчику міряється мікровольтметром типу В2-25, з точністю від 1,5 до 0,5 у залежності від шкали вимірювань.

Для вимірювання спектральної характеристики лампи ДРФ-1000, зібрана установка, що працює за наступною схемою. Світло від досліджуваного джерела через тубус, що представляє собою порожню чорну трубу з внутрішнім діаметром 40 мм і кутом зору 4°, для одержання рівнобіжного пучка світла, надходить на сульфідно-кадмієвий датчик, перед яким установлюється світлофільтр. Величина напруги на датчику фіксується мікровольтметром В2-25.

Як світлофільтри використовуються інтерференційні фільтри, що мають ширину смуги пропускання $\Delta\lambda_{0,5}$ = 6-10 нм, при пропусканні рівному половині максимального. За допомогою набору таких світлофільтрів знімаються характеристики лампи в інтервалі довжини хвиль від 400 до 813 нм, як показано на рис. 6.17. На цьому рисунку показаний також спектр поглинання сонячної енергії рослиною.

Визначення розмірів устячок. В усіх серіях дослідів проводиться вивчення ступеня відкриття устячок у залежності від зовнішніх факторів, визначення їхньої довжини і кількості на одиниці поверхні листка. Для цього наприкінці кожного режиму з верхньої і нижньої поверхні листка знімаються відбитки за допомогою безбарвного швидковисихаючого лаку. Відбитки поміщаються під мікроскоп марки МЛ-2Б і в прохідному світлі при збільшенні в 110 разів визначається кількість устячок на одиниці поверхні листка. Площа поля зору мікроскопа при цьому збільшенні дорівнює 0,881мм^2. Потім при збільшенні в 1000 разів, коли в полі зору мікроскопа буде тільки одне устячко, визначається довжина устячкової щілини і робляться знімки на плівку Мікрат–300 декількох устячок, для визначення ширини устячкової щілини. Ширина устячкової щілини знімається з плівки через фотозбільшувач при загальному збільшенні в 2500 разів. Дані по ширині устячок осереднюються для кожного режиму досліду, а по довжині устячок і їхній кількості на одиниці поверхні листка- по видах і віку рослин. Максимальна погрішність визначення ширини устячкової щілини складає 25 %.

6.4.3 Станції штучного клімату

Велике поширення в області наукових досліджень одержують великі

інженерні комплекси, що включають десятки установок штучного клімату з різними параметрами повітря. Уперше такі установки були створені для досліджень в області фізіології рослин і одержали назву фітотронів.

Згідно роботи М.Б. Халамейзера подібні установки забезпечують задані параметри повітря і дозволяють регулювати інтенсивність і спектр освітлення, газовий склад середовища і т.п. Аналогічні інженерні комплекси широко застосовуються й у загальній біології, забезпечуючи можливість вивчення впливу кліматичних умов на світ живої природи.

Розглянемо конструкцію сучасної станції штучного клімату. На рис. 6.18 приведений поетажний план і розріз будинку цього фітотрона. Вісім оранжерей і дванадцять кліматизуємих приміщень зі штучним освітленням оточені з усіх боків загальним коридором і цілком ізольовані від першого поверху будинку. Поверхом вище розташовані лабораторії, а в двох нижніх поверхах розміщені кондиціонери й інші технологічні об'єкти – теплоцентр, холодоцентр та ін. Крім того, мається так названий асептичний поверх, що складається з «холодних» і «прохолодних» приміщень у західній частині, «теплих», «екваторіальних» і з кліматом пустелі Сахари в східній частині.

Кожне приміщення має автономну установку штучного клімату з власною системою регулювання; безперервна градація температури різних приміщень забезпечує взаємозамінність приміщень і підвищує надійність проведення експериментів у випадку аварій чи зупинок устаткування одного з приміщень. Фітотрон дозволяє створювати умови по температурі від –10 до +45 °С.

Принципова схема кліматичних установок приведена на рис. 6.19. Для приміщень зі штучним освітленням забезпечується повітрообмін, рівний 80 об'ємам/год., а для оранжерей – 120 об'ємів/год.. Конструкція перфорованої підлоги забезпечує переміщення повітря по висоті зі швидкістю 10–20 см/сек. Оранжереї мають подвійний вітраж, у якому циркулює сухе повітря з температурою на 5 °С вище температури повітря усередині оранжереї. Це дозволяє уникнути конденсації вологи, як на внутрішній, так і на зовнішній стороні вітража. По зовнішній поверхні вітража стікає вода, що розподіляється рівномірним шаром шляхом розбризкування.

Водяний екран обмежує проникнення теплового випромінювання, забезпечує кращий розподіл падаючого світлового потоку за рахунок ефекту розсіювання, створюючи напівтіньові зони замість тіней від конструктивних елементів. Параметри повітря регулюються двома термометрами опору – сухому і вологому, встановленим у приміщеннях. Повітря в подвійному вітражі регулюється диференціальним регулятором температури, що керує роботою калорифера підігріву повітря.

Регулятор температури сухого термометра керує роботою

виконавчих механізмів калорифера підігріву повітря і поверхневого повітроохолоджувача. Регулятор температури вологого термометра керує роботою парогенератора, регулюючи рівень води в ньому, а також виконавчим механізмом поверхневого повітроохолоджувача. Задані значення температур, сухого і вологого терморегуляторів можуть змінюватися спеціальним програмним тимчасовим пристроєм (для режимів «День» і «Ніч»).

За принципом дії всі системи регулювання є релейно-імпульсними. Ці системи забезпечують у приміщеннях зі штучним освітленням точність ±0,1 °С у будь-якій точці по сухому термометрі і ±0,2 °С по вологому. Для оранжерей точність регулювання відповідно дорівнює ±0,2 °С і ±0,3 °С. При частих змінах зовнішніх кліматичних умов точність регулювання знижується відповідно до ±0,5 і ±0,7 °С. Постійна часу обох об'єктів регулювання при різкій зміні за завданням дорівнює 1 год.

Темні приміщення освітлюються люмінесцентними лампами і лампами накалювання. Центральний пульт керування освітленням дозволяє керувати роздільно включенням 2688 ламп.

Технічний напівповерх, розташований над лампами, дає можливість при необхідності проводити швидку заміну ламп джерелами світла іншого спектрального складу. У кожнім приміщенні забезпечується освітленість у межах 20000-30000 люкс. Для видалення тепла, що виділяється лампами, вентиляційна установка подає 142250 м^3/год. повітря заданих параметрів.

У південному коридорі фітотрона розташований комплекс пультів керування системами кондиціонування і дистанційного контролю параметрів повітря.

Очищення повітря, яке подається в установки штучного клімату, проводиться спеціальним пристроєм – баштою з нагрівальними і конденсаційними елементами, що розділяє повітря на три потоки. Це повітря надходить у спеціальний очисний пристрій площею близько 270 м^2.

Перший потік повітря (27500 м^3/год.) використовується для охолодження пускових пристроїв люмінесцентних ламп, другий потік (36800 м^3/год.) – для охолодження ламп у чотирьох приміщеннях, третій потік (58000 м^3/год.ч) розділяється на дві частини: 34000 м^2/год. підігрітого до 15 °С повітря забезпечує приміщення зі штучним охолодженням і оранжереї, а 24000 м^3/год. збезводненого і підігрітого повітря подається в кліматичні установки восьми приміщень, у подвійні вітражі оранжерей і в «холодні» приміщення у вигляді додаткового, свіжого повітря.

Система очищення повітря включає послідовний ланцюг установок пристрою: для прожарювання повітря і продувки через скловату, спеціальний паперовий фільтр, що затримує 100 % пилу і 99,8 % диму,

попередній масляний фільтр і пристрої хімічного очищення активованим вугіллям.

Вода для поливу рослин має таку ж температуру, як і температура повітря у відповідних приміщеннях. Це особливо важливо при високій точності стабілізації температури повітря в приміщеннях, тому що вода довільної температури вносила б значні збурювання в системі регулювання.

Установка штучного клімату Бельгійського фітотрона з внутрішнім освітленням приведена на рис. 6.20. Підготовка повітря здійснюється в кондиціонері, де воно нагрівається електричними калориферами, а охолоджується поверхневим охолоджувачем, у який вода надходить з баків, де вона охолоджується випарниками холодильних машин.

Задана відносна вологість у приміщенні досягається трьома способами:

а) створенням туману за допомогою апарата «дефензора», розміщеного при вході повітря в приміщення. Цей апарат складається з резервуара, заповненого водою до постійного рівня, і розпилювальної установки. Електродвигун обертає турбінку, що усмоктує воду, збільшуючи її швидкість до 30 м/сек. З цією швидкістю вода надходить у горловину розпилювача, яким вона викидається назовні у виді туману (діаметр крапельок $5 \cdot 10^{3} \div 10 \cdot 10^{-3}$ мм). Пересичена суміш водяний туман – повітря виходить з апарата через сітчастий ковпачок, у якому більш великі краплі роздрібнюються; витрати води – 2 л/год.;

б) розпиленням води форсунками, розташованими перед входом повітря в приміщення;

в) упорскуванням пари в потік повітря на виході його з кондиціонера; пара подається із спеціальних парогенераторів; повітря осушується батареями поверхневого охолоджувача при температурі поверхні нижче температури точки роси. Фітотрон має чотири кліматизуємих приміщення такого типу.

Другий тип установки фітотрона показаний на рис. 6.21. Тут джерела світла ізольовані від приміщення подвійним склом і охолоджуються потоком повітря за допомогою вентилятора (таких установок дві). Температура і вологість повітря в приміщеннях регулюються електричними регуляторами пропорційної дії.

При конструюванні установок штучного клімату фітотронів розглядаються різні варіанти регулювання і контролю параметрів повітря, доцільність яких визначається розмірами і призначеннями станцій штучного клімату, кількістю і типом застосовуваних установок, а також економічними можливостями.

Можливі наступні варіанти систем автоматичного регулювання і контролю параметрів повітря:

1. Автономні системи автоматичного регулювання параметрів повітря для кожної установки та централізований контроль параметрів з диспетчерського пункту або пульта за допомогою машини багатоканального контролю.

2. Автономні системи автоматичного регулювання і контролю параметрів повітря для кожної установки.

3. Автономні системи регулювання параметрів повітря і централізований груповий контроль за допомогою багатоточкових електронних мостів.

4. Централізоване регулювання і контроль параметрів повітря за допомогою багатоканальних машин централізованого контролю та регулювання.

5. Групове централізоване регулювання і контроль за допомогою електронних багатоточкових мостів.

Застосування багатоканальних систем регулювання забезпечує збільшення можливості ймовірності безвідмовної роботи регульованих систем

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Антонеко В.С., Гойса Н. И., Гаценко Р.В. Методические рекомендации по расчету растительной массы и урожая зерна озимой пшеницы. – Киев: 1990. – 120 с.

2. Аэрокосмические методы исследования сельскохозяйственных угодий. //Под ред. Ю.К. Росса, И.Ф. Берестовского, А.Д. Клещенко. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 131 с.

3. Вериго С.А, Разумова Л.А. Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве. – Л.: Гидрометеоиздат, 1963. – 289 с.

4. Вольвач В.В. Агрометеорологическая микропроцессорная станция. //В сб.: Вопросы создания и внедрения перспективных технических средств и систем. – С.-П.: Гидрометеоиздат, 1996. – № 4. – С. 19-30.

5. Вольвач В.В., Ахметзянов Р.В и др. Информационно-измерительный комплекс НИАК для микроклиматических и градиентных измерений. //В сб.: Вопросы создания и внедрения перспективных технических средств и систем. – М.: Гидрометеоиздат, 1990. – №3. – С. 65-72.

6. Галямин Е.П. Оптимизация оперативного распределения водных ресурсов в орошении. – Л.: Гидрометеоиздат. 1981. – 272 с.

7. Гойса Н.И., Олейник Р.Н., Рогаченко А.Д. Гидрометеорологический режим и продуктивность орошаемой кукурузы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 230 с.

8. Гридасов В.Ф. Агрогидрологические свойства осушаемых земель. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 175 с.

9. Дмитриев А.В., Фридман Ш.Д. Основы дистанционных методов измерения влагозапасов в снеге и влажности почв по гамма-излучению земли. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 304 с.

10. Емельянов В.А. Гамма-лучи и нейтроны в полевых почвенно-мелиоративных исследованиях. Теория и практика применения гамма-лучей и нейтронных методов. – М.: Госатомиздат, 1962. – 223 с.

11. Использование современных технических средств по влагометрии в практике обеспечения сельскохозяйственного производства. //Под ред. В.Н. Хомякова, Л.И. Балиной. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 132 с.

12. Итоги исследований фотосинтеза и продуктивности в Эстонской ССР // Тезисы докладов. – Таллин-Тарту, 1981. – 93 с.

13. Клещенко А.Д. Оценка состояния зерновых культур с применением дистанционных методов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 181 с.

14. Ковтун И.И., Гойса Н.И., Митрофанов Б.А. Оптимизация условий

возделывания озимой пшеницы по интенсивной технологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. –288 с.

15. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П. Аэрокосмические исследования почв и растительности. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 331 с.

16. Коровин А.И. Роль температуры в минеральном питании растений. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 283 с.

17. Коровин А.И. Растения и экстремальные температуры. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 271 с.

18. Коровин А.И., Мамаев Е.В., Мокиевский В.М. Осенне-весенние условия погоды и урожай озимых. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. –160 с.

19. Куперман Ф.М., Моисейчик В.А. Методическое пособие //Оценка состояния зерновых культур методом биологического контроляв осенний, зимний и весенний периоды. – М.: Гидрометеоиздат, 1977. – 24 с.

20. Куперман Ф.М., Ржанова Е.И. Биология развития растений. – М.: Висшая школа, 1963. – 423 с.

21. Мелешко К.Е. Спектрофотометрические исследования природных покровов Земли. – Л.: Недра, 1976. – 111 с.

22. Моделирование продуктивности агроэкосистем. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 264с.

23. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. Вып. 11. Ч. I. – 316 с.

24. Научно-методические основы полевого, лабораторного и машинного эксперимента. – Л.: Изд-во АФИ, 1982. – 130 с.

25. Ничипорович А.А., Строганова Л.Е. и др. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 136 с.

26. Оценка влияния агрометеорологических условий на продолжительность этапов органогенеза, формирование элементов продуктивности и урожайность озимой пшеницы. Методическое пособие. //Под ред. Е.С. Улановой. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 42 с.

27. Полевой А.Н. Сельскохозяйственная метеорология. – С.-П.: Гидрометеоиздат, 1992. – 424 с.

28. Польовий А.М., Божко Л.Ю. та ін. Практикум з сільськогосподарської метеорології. – Одеса: Вид-во "ТЄС", 2002. – 400 с.

29. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы. – л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 312 с.

30. Рачкулик В.И., Ситникова М.В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. – Л.: гидрометеоиздат, 1981. – 287 с.

31. Росс Ю.К. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 342 с.

32. Руководство по теплобалансовым наблюдениям. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 193 с.

33. Сабинин Д.А. Физиология развития растений. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 195 с.

34. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 167 с.

35. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 200 с.

36. Урываев В.А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. – Л.: Гдрометеоиздат, 1953. – 232 с.

37. Федченко П.П., Кондратьев К.Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 231 с.

38. Фотосинтетическая продуктивность растительного покрова. – Тарту: Изд-во Ин-та физики и астрономии АН ЭССР, 1969. – 185 с.

39. Халамейзер М.Б. Автоматические установки искусственного климата. – М.: Изд-во Машиностроение, 1969. – 311 с.

40. Харченко С.И. Гидрология орошаемых земель. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 373 с.

41. Чирков Ю.И. Агрометеорологические условия и продуктивность кукукрузы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – 251 с.

42. Чудновский А.Ф., Тимофеев Ю.В., Шиндеров Б.Л. Аэродистанционное приземное зондирование сельскохозяйственных полей.– Л.: Гидрометеоиздат, 1985.– 271 с.

43. Шевелуха В.С. Рост растений и его регуляция в онтогенезе. – М.: Колос, 1992. – 593 с.

44. Шульгин И.А. Растение и Солнце. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 251 с.

45. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. – М.: Наука, 1986. – 190 с.