УДК 558.8.003

І.А. Пількевич
д.т.н., доцент
Житомирський національний агроекологічний університет
Рецензент – член редколегії «Вісник ЖНАЕУ», д.т.н. І.Г. Грабар

ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ЗА БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИМИ ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Проведено аналіз методики прогнозування врожайності озимої пшениці на основі комплексної обробки наземної та космічної інформації. Розроблено модифікований варіант даної методики, яку можна застосовувати для регіонів з великою хмарністю (наприклад, для Житомирського регіону). Запропонований комплекс технічних засобів для реалізації розробленої методики.

Вступ

Інтенсивні технології вирощування озимої пшениці, які застосовуються останнім часом, передбачають системний підхід до подолання факторів, що лімітують врожай [1]. Для цього потрібно оперативно забезпечувати хліборобів інформацією про стан сільськогосподарських рослин протягом вегетації й агрометеорологічні та біологічні умови, що впливають на врожай. У сучасних умовах таку інтегральну інформацію оперативно та економно можна отримати лише за допомогою методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Використання цих методів дає можливість оцінити сезонну динаміку параметрів рослинного покриву, одержати додаткові відомості про стан культур і розробити алгоритм прогнозування врожайності.

Необхідність проведення моніторингу стану сільськогосподарських угідь в Україні з використанням матеріалів космічної зйомки зумовлена кількома причинами, і, насамперед, економічними, тому що за матеріалами космічної зйомки можна з достатньою періодичністю схарактеризувати значні площі. При цьому істотно скорочуються витрати, потрібні на нагромадження величезної кількості фактичного матеріалу, який слід зібрати для всієї досліджуваної площі за визначений період часу, лімітований тривалістю конкретної фази розвитку рослин. Одержання подібної інформації за допомогою аерофотознімання вимагає значних витрат часу, сил і засобів. Крім того, зйомка виконується практично за єдиних умов освітленості, а просторова розрізнювальна здатність одержуваних космічних знімків нівелює локальні особливості рослинності, підкреслюючи основне, що дуже важливо для проведення широкомасштабних спостережень за станом посівів. На борту космічного апарата (КА) розміщена різноманітна знімальна апаратура, що дає можливість синхронно вести багатоспектральну зйомку з різною просторовою розрізнювальною здатністю на місцевості, а також радіолокаційну і теплову. Використання матеріалів синхронних зйомок значно

© І.А. Пількевич

підвищує надійність і вірогідність прогнозування врожаю. А дистанційні методи агробіологічного контролю за його формуванням є важливою складовою інтенсивної технології вирощування зернових культур на сучасному етапі.

У країнах Європейського Союзу в рамках проекту MARS у 1996 р. була реалізована програма прогнозування врожаю на основі супутникових даних низької розрізнювальної здатності. В Україні подібних розробок не існує. Разом з тим, згідно з дослідженнями Дж. Тейлора із співробітниками [2], точність прогнозів, отриманих за допомогою застосування методів дистанційного зондування, не поступається точності, одержаній із залученням статистичних методів аналізу тимчасового тренда. Окремі роботи українських дослідників О.О. Кривобока [3] та В.С. Антоненка [4] з дистанційного вивчення деяких параметрів агроценозів ґрунтуються переважно на даних наземних і літакових спектрофотометричних досліджень. На достатньо високому науково-методичному рівні ведеться розробка блока супутникової інформації у Науковому центрі аерокосмічних досліджень Землі. Упродовж останніх років тут активно напрацьовуються матеріали для створення методики прогнозування врожайності озимої пшениці на рівні адміністративних районів за допомогою використання інформації з приладів ДЗЗ [5].

Методику "Прогнозування врожайності озимої пшениці на основі комплексного оброблення наземної та космічної інформації" можуть застосовувати спеціалісти сільського господарства і агрометеорологи для оперативних рішень з мінімальними витратами часу, коштів та людських ресурсів. Методика [5] призначена для прогнозування врожайності озимої пшениці на основі використання багатоспектральних космічних знімків різної просторової розрізненості в межах Київської області. Застосування методики в інших регіонах України потребує врахування особливостей цих територій.

Теоретичне обґрунтування методики обробки аерокосмічних даних

Показник продуктивності рослин становить практичний інтерес як для планетарної оцінки усіх біоценозів Землі, так і для регіональної оцінки врожайності різних сільськогосподарських угідь, передусім посівів зернових. Насамперед він залежить від інтенсивності засвоєння рослинами вуглекислого газу, тобто від процесу фотосинтезу. Сформульована О.А. Ничипоровичем [6] теорія фотосинтетичної продуктивності започаткувала основи вдосконалення методів кількісного аналізу продукційних процесів за показниками, які характеризують фотосинтетичну діяльність рослин у посівах, – листковий індекс (ЛІ) та листковий фотосинтетичний потенціал. Оскільки існують алгоритми розрахунку ЛІ на основі дистанційних даних [1], є сенс говорити про можливість дистанційного визначення продуктивності рослинного покриву.

Для оцінки чистої продуктивності екосистем найчастіше використовують дані сканера AVHRR з КА низької розрізнювальної здатності (за їх допомогою розраховують вегетаційний нормалізовано-різницевий індекс (ВНРІ)). Потім цей

індекс вводять до експериментальних моделей, за допомогою яких оцінюють чисту продуктивність як регіональних екосистем, так і планети взагалі. Обсяги архівів ВНРІ-зображень, які одержують за даними сканера AVHRR КА низької розрізнювальної здатності, постійно збільшуються, це дає можливість проводити часовий аналіз змін земного покриву і використання земель.

Теоретико-методичні підходи до розробки математичних моделей прогнозування врожайності зернових культур з використанням супутникових даних

Теоретичною основою використання знімків сканером AVHRR КА низької розрізнювальної здатності (НРЗ) для прогнозування врожайності є відомі залежності природної продуктивності ґрунтів від абсорбованої фотосинтетично активної радіації (АФАР), підсумованої за період вегетації та помноженої на певний коефіцієнт E, що враховує особливості ґрунтів і клімату окремого району. Продуктивність ґрунту визначається за формулою:

$$P = E\int_0^t f(t)T_\phi^2(t)dt\,, \qquad (1)$$

де f – частина фотосинтетично активної радіації (T_ϕ^2) абсорбованої; P – продуктивність ґрунту, кг/га; E – коефіцієнт, що враховує кліматичні умови; 0 і t – початок і кінець сезону вегетації.

В [7] теоретично та експериментально проаналізовано зв'язок між ВНРІ та АФАР. Тому величину $f(t)$ в (1) можна замінити на вегетаційний нормалізовано-різницевий індекс $I_{внр}$:

$$P = E\int_0^t \left(aI_{внр} + b\right)T_\phi^2(t)dt\,, \qquad (2)$$

де a, b – коефіцієнти рівняння регресії.

З огляду на те, що E і T_ϕ^2 є багато в чому константами для конкретного району, можна оцінити природну продуктивність ґрунту лише за даними ВНРІ. Коефіцієнт E визначають за кліматичними умовами, і, насамперед, водним стресом. З урахуванням цього деякі дослідники використовують дані зйомки з КА НРЗ для створення емпіричних моделей прогнозування врожайності, зокрема, зернових культур. Так була встановлена залежність між урожайністю Y і сумою накопичень ВНРІ за період вегетації з коефіцієнтом кореляції близько 0,7 [1]. Прикладом такої залежності може бути рівняння, запропоноване у статті [8] для однієї з сільськогосподарських провінцій Італії:

$$Y = -65{,}94 + 46{,}23\sum_{i=12}^{17} I_{внр_i}\,,$$

де i – порядкова декада року.

Нині ведуться роботи, які мають підвищити надійність кореляції супутникової інформації та врожайності. Наприклад, робляться спроби обліку метеорологічних факторів: опадів $R_{оп}$; температури повітря $T_{пов}$; температури землі $T_з$; сонячної радіації T_c^2 та аналізуються можливості використання накопичень сум ВНРІ $\left(\sum I_{внр}\right)$ за певні періоди для окремих видів сільськогосподарських культур, типів ґрунтів тощо. Для аналізу залежностей використовують техніку множинної лінійної чи нелінійної регресії у вигляді конкретних рівнянь.

Одне з таких рівнянь отримано для району Кастилія (Іспанія) [1]. Воно вдало описує взаємозв'язок урожайності зернових культур зі спектральними яскравостями, визначеними за знімками сканером AVHRR КА низької розрізнювальної здатності, і агрометеорологічними даними:

$$Y = \alpha + \beta\overline{I_{внр}} + \gamma\overline{T_c^2} + \delta\overline{\left(T_з - T_{пов}\right)} + \varepsilon\overline{R_{оп}},$$

де $\overline{I_{внр}} = \frac{\sum_{i=1черв}^{31лип}\left(I_{внр_i} - I_{внр_{січ}}\right)}{n\left(1черв - 31лип\right)}$; $\overline{T_c^2} = \frac{\sum_{i=20квіт}^{10лип} T_{c_i}^2}{n\left(20квіт - 10лип\right)}$; $\overline{T_з - T_{пов}} = \frac{\sum_{i=20квіт}^{10лип}\left(T_{з_i} - T_{пов_i}\right)}{n\left(20квіт - 10лип\right)}$;

$\overline{R_{оп}} = \frac{\sum_{i=1трав}^{10лип} R_{оп_ы}}{n\left(1трав - 10лип\right)}$; n – кількість днів; середні значення $\alpha = 8970$, $\beta = 3590$, $\gamma = -81$, $\delta = 2215$, $\varepsilon = 63$.

Параметри температури та опадів, які входять до рівнянь, підкреслюють необхідність інформації про водний стрес, оскільки водні ресурси звичайно є основним лімітуючим фактором у посушливих регіонах. Використання подібного рівняння дає змогу одержати карту прогнозованої врожайності для всієї області дослідження.

Деякі додаткові параметри, крім суми накопичених ВНРІ за визначений період часу, наприклад, відсоток оброблюваних земель, можна досить надійно встановити за даними ДЗЗ. Так рівняння прогнозу врожайності проса для районів Сенегалу, де площа оброблювальних земель становить понад 22,5 %, має вигляд [1]:

$$Y = 774{,}1\left(\sum_{i=1вер}^{10жовт} I_{внр_i} - \sum_{i=1трав}^{31трав} I_{внр_i}\right) - 1195 \Rightarrow \left(r^2 = 0{,}729\right).$$

Якщо відсоток оброблюваних земель менше 22,5 %, складено подібне рівняння, але менш надійне:

$$Y = 3793{,}7\left(\sum_{i=1вер}^{10жовт} I_{внр_i} - \sum_{i=1трав}^{31трав} I_{внр_i}\right) - 254 \Rightarrow \left(r^2 = 0{,}637\right).$$

Проте якщо при цьому відомий відсоток оброблюваних земель $(S_{\%})$ визначений за допомогою дистанційних методів, то можна отримати надійну модель:

$$Y = 3881{,}1\left(\sum_{i=1вер}^{10жовт} I_{внр_i} - \sum_{i=1трав}^{31трав} I_{внр_i}\right) + 25{,}0 \cdot S_{\%} - 531 \Rightarrow \left(r^2 = 0{,}763\right).$$

Незаперечною перевагою таких моделей є те, що немає потреби використовувати досить великі набори наземних агрометеорологічних даних. Здебільшого такі дані або важко зібрати, або їх зовсім не існує.

Практичне застосування наземної та космічної інформації для прогнозування врожайності

Для дешифрування інформації про склад рослинності агроекосистем, яка є в матеріалах ДЗЗ, проводять підбір і польове обстеження тестових ділянок. Дешифрувальні ознаки агроценозів як об'єктів досліджень поділяють на три групи:

прямі – властивості об'єктів, що проявляються на поверхні Землі, реєструються бортовим комплексом ДЗЗ і відображаються у вигляді набору спектральних яскравостей елементів зображення;

непрямі – властивості об'єктів, що не реєструються бортовим комплексом ДЗЗ, але деяким чином пов'язані із набором прямих ознак;

контекстуальні – властивості об'єктів земної поверхні, що визначаються для деякого об'єкта з аналізу ознак об'єктів, що його оточують.

Для посівів озимої пшениці прямі ознаки можна згрупувати у два блоки: а) геометричні форми полів; б) спектральні параметри: набір спектральних сигнатур, отриманих зі знімків високої просторової розрізненості, та часові профілі значень вегетаційного індексу $I_{внр}$, розраховані зі знімків низької просторової розрізненості в моменти проходження озимою пшеницею основних фенологічних фаз розвитку.

Непрямі та контекстуальні ознаки встановлюють залежно від інформації про посіви озимої пшениці у конкретному регіоні.

Для постійного моніторингу стану посіві озимої пшениці з метою прогнозування їх урожайності необхідно використовувати дані з КА НРЗ та Landsat-7. Знімки з КА Landsat високої просторової розрізнювальної здатності забезпечують досить надійну інформацію про розміщення посівів озимої пшениці та про їх стан у певний момент часу. За знімками сканером AVHRR з КА низької розрізнювальної здатності, що мають високу розрізнювальну здатність у часі, можна спостерігати за динамікою змін стану посівів. Комплексування цих даних з агрометеорологічною інформацією дає змогу підвищити надійність та достовірність прогнозів урожайності. Аналогічний підхід використовують у найбільш розвинутих країнах світу. Методика робіт

ґрунтується на визначенні нормалізованого вегетаційного індексу $I_{внр}$ за знімками сканером AVHRR з КА низької розрізнювальної здатності за період вегетації. Одержані значення індексу ВНРІ зіставляють з даними щодо врожайності пшениці. Методом регресійного аналізу встановлюють залежність між значеннями ВНРІ, а також агрометеорологічними даними та врожайністю пшениці, що використовується для прогнозу.

Як показав досвід проведених робіт, у межах Житомирського регіону через велику постійну хмарність кількість знімків для визначення ВНРІ є обмеженою (у середньому один-два знімки за декаду). Тому методика прогнозування, що заснована на використанні сумарних подекадних знімків, виявилася практично незадовільною, тому для Житомирського регіону розроблений модифікований варіант методики.

Модифікований варіант методики, придатний для Житомирського регіону

В основу робіт покладено матеріали зйомок сканером AVHRR з КА низької розрізнювальної здатності за квітень–червень 2001, 2002 і 2003 рр., знімки Landsat-7 (18.05.2001, 21.05.2002) Житомирського регіону, а також відомості врожайності озимої пшениці у межах конкретних господарств.

Досвід проведених досліджень показав, що для розробки методичних питань потрібен відповідний рівень деталізації оброблення знімків сканером AVHRR з КА низької розрізнювальної здатності, які слід зіставляти з конкретними ділянками формування зернових культур і з конкретними значеннями врожайності. Це, безумовно, дає можливість проводити обробку знімків якісніше. Для цього потрібно, по-перше, визначити, за даними КА низької розрізнювальної здатності, піксели знімка, що переважно охоплюють площі посівів зернових культур (насамперед озимої пшениці); по-друге, провести на основі даних саме цих пікселів прогнозування врожайності зернових культур. Таким чином вирішують завдання розподілу площ посівів зернових культур і прогнозування врожайності на різних стадіях вегетації. Одним з обов'язкових елементів для вирішення цих завдань є створення електронної карти-схеми землекористування, яка відображає межі окремих господарств і структуру посівів на період проведення досліджень. Така схема є предметом самостійних досліджень і, відповідно, має самостійне практичне значення.

В ході досліджень було встановлено, якими сільськогосподарськими культурами зайняті окремі поля і, зокрема, де розміщені посіви озимої пшениці – основний об'єкт досліджень. Побудовані схеми землекористування мають самостійне значення і місцеві державні органи зацікавлені в них.

Для статистичного аналізу використовувалися дані врожайності полів озимої пшениці у конкретних господарствах і відповідні значення яскравостей, які отримано завдяки процедурам, виконаним на попередньому етапі робіт. Згідно з аналізом, існує кореляційний зв'язок між наземними задвірковими даними та

даними зйомки з КА низької розрізнювальної здатності. При цьому було розглянуто різні види регресійних залежностей для пошуку найбільш надійних для прогнозування врожайності.

Попередній аналіз показав значні відмінності у динаміці змін усередненого індексу ВНРІ та усереднених максимальних значень ВНРІ між врожайними роками, якими були 2001 і 2002, та несприятливим 2003 р., коли основна частина посівів озимої пшениці загинула. Отримані діапазони змін ВНРІ можна використовувати для моніторингу стану посівів озимої пшениці у межах відповідних районів у майбутні роки.

Отже, лінійна залежність видається придатнішою для прогнозування врожайності, але потребує перевірки на більшій кількості даних. Можливо, цю залежність слід удосконалити. Крім того, нагромадження агрометеорологічної інформації відносно варіацій опадів і температур у межах деяких районів Житомирської області, що проводиться на цей час, сприятиме створенню складніших залежностей, в яких будуть враховані агрометеорологічні дані. Проте зауважимо, що у цьому разі прогнозування залежатиме від певного обсягу супутньої інформації, крім даних ДЗЗ, що іноді може суттєво перешкоджати оперативності прогнозування. Тому, не відкидаючи можливість побудови регресійних рівнянь з урахуванням агрометеорологічних показників, у майбутньому значну увагу слід приділяти поліпшенню прогнозування врожайності на основі лише дистанційної інформації. Отримані дані засвідчують принципову можливість такого підходу для незалежної оцінки і прийняття відповідних рішень.

На основі викладеного вище можна підсумувати, у чому полягає послідовність виконання операцій обробки даних під час прогнозування врожайності озимої пшениці: методом обробки даних є контрольована класифікація, а також регресійний аналіз для встановлення взаємозв'язку між космічною інформацією та врожайністю озимої пшениці.

Оператор має виконувати такі операції:

1) за космознімком з високою розрізненістю (КА Landsat сканером ETM^+, SPOT XI) визначити сигнатури сільськогосподарських посівів або навчальні вибірки для об'єктів дослідження; при цьому слід використовувати сфери інтересу. Кожен досліджуваний клас можна визначати однією чи кількома сигнатурами;

2) оцінити їх характеристики та статистичну роздільність, обчисливши матрицю похибок;

3) здійснити класифікацію за методом найбільшої вірогідності з такими умовами: обрано усі визначені сфери інтересу; значення відхилення від середнього не задано; значення помилки відстані не задано; результат класифікації записано до пам'яті; значення помилки відстані не задано;

4) якщо на зображенні є хмарність, слід провести операції класифікації для інших зображень цього самого регіону і здійснити з використанням інших даних тієї самої території мозаїку для вилучення хмарності із кінцевого продукту;

5) оцінити точність класифікації;

6) виділити озиму пшеницю в окремий клас;

7) сумістити усі знімки сканером AVHRR КА низької розрізнювальної здатності (хмарність яких не перевищує 10 %), отримані у період весняної вегетації озимої пшениці, з результатами класифікації за космознімком високої просторової розрізненості (КА Landsat сканером ETM^{+}, SPOT-4);

8) встановити значення BHPI та інтегрувати їх за вегетаційний період для ділянок з посівами озимої пшениці;

9) зкорелювати інтегровані дані BHPI з наземними задвірковими даними врожайності озимої пшениці;

10) оцінити похибку кореляційних залежностей, які використовуватимуться для прогнозування врожайності;

11) провести прогнозування для оцінки врожайності на рівні конкретного району.

Методика прогнозування врожайності озимої пшениці на основі комплексної обробки наземної та космічної інформації

Методом обробки даних є контрольована класифікація, а також регресійний аналіз для встановлення взаємозв'язку між космічною інформацією та врожайністю озимої пшениці. Тому під час прогнозування врожайності озимої пшениці необхідно виконувати такі операції:

– за космознімком з високою розрізненістю визначити сигнатури сільськогосподарських посівів або навчальні вибірки для об'єктів дослідження; при цьому слід використовувати сферу інтересу. Кожен досліджуваний клас можна визначати однією чи кількома сигнатурами;

– оцінити їх характеристики та статистичну роздільність, обчисливши матрицю похибок;

– здійснити класифікацію за методом найбільшої вірогідності з такими умовами: обрано усі визначені сфери інтересу; значення відхилення від середнього не задано; значення помилки відстані не задано; результат класифікації записано до пам'яті; значення помилки відстані не задано;

– якщо на зображенні є хмарність, слід провести операції класифікації для інших зображень цього самого регіону і здійснити з використанням інших даних тієї самої території мозаїку для вилучення хмарності із кінцевого продукту;

– оцінити точність класифікації;

– виділити озиму пшеницю в окремий клас;

– сумістити усі знімки сканером AVHRR з КА низької розрізнювальної здатності (хмарність яких не перевищує 10 %), отримані у період весняної вегетації озимої пшениці, з результатами класифікації за космознімком високої просторової розрізненості;

– встановити значення вегетаційного нормалізовано-різницевого індексу та інтегрувати їх за вегетаційний період для ділянок з посівами озимої пшениці;

– зкорелювати інтегровані дані вегетаційного нормалізовано-різницевого індексу з наземними задвірковими даними врожайності озимої пшениці;

– оцінити похибку кореляційних залежностей, які використовуватимуться для прогнозування врожайності;

– провести прогнозування для оцінки врожайності на рівні конкретного району.

Для реалізації запропонованої методики необхідно мати комплекс технічних засобів, який працює під керуванням 32-розрядних операційних систем Microsoft Windows 2000 Professional або Windows XP Professional, а також він складається на базі ПЕОМ з характеристиками не гірше ніж:

– процесор Intel Pentium III 733 MHz (рекомендується Intel Pentium 4 3,0 MHz);

– оперативна пам'ять SDRAM PC133 256 MB (рекомендується DDR SDRAM PC3200 512 MB);

– жорсткі диски – 2×80 GB (рекомендується 2×160 GB);

– відеоадаптер XGA $1024 \times 768 \times 16$ bit (рекомендується SXGA $1280 \times 768 \times 32$ bit);

– монітор із розміром діагоналі 17″ (рекомендується 19″);

– оптичний привод CD-ROM 32x (рекомендується DVD-ROM 16x/40x).

Висновки та практичні рекомендації

1. Запропонована методика дає можливість оперативно стежити за розвитком озимої пшениці на значних площах і оцінювати її врожайність із завчасним уточненням результатів прогнозу. Точність прогнозів, отриманих за допомогою застосування методів дистанційного зондування, не поступається точності, одержаній із залученням статистичних методів аналізу тимчасового тренда (відносна помилка дорівнює 5–8 %). Методика орієнтована на використання матеріалів космічної зйомки, виконаної для території України, де кількість безхмарних і малохмарних днів порівняно невелика.

2. Методика ґрунтується на даних щодо спектральних яскравостей посівів озимої пшениці на основних етапах її розвитку, які отримано за допомогою аналізу багатоспектральних космічних знімків, а також наземних досліджень стану та врожайності посівів.

3. Ефект від використання запропонованої методики оцінки стану посівів озимої пшениці і прогнозу її врожайності полягає у тому, що агровиробничі організації за результатами досліджень можуть вчасно вжити потрібних заходів для поліпшення стану посівів, які допоможуть істотно знизити втрати врожаю, спричинені можливими несприятливими агрометеорологічними чи біологічними факторами.

Література

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування : монографія / за ред. *В.І. Ляльки, М.О. Попова*. – К. : Наукова думка, 2006. – 357 с. – (проект "Наукова книга").
2. Regional Crop Inventories in Europe Assisted by Remote Sensing: 1988–1993 / *C. Taylor, C.A.D. Sannier, J. Delince, F.J. Gallego*. – Europ. Commission, EUR 17319, 1997. – 80 p.
3. *Кривобок О.А*. Методи автоматизованої обробки та інтерпретації даних багатоспектральної супутникової зйомки посівів сільськогосподарських культур в Україні : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.11 "Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів" / *О.А. Кривобок*. – Одеса, 1997. – 16 с.
4. *Антоненко В.С.* Агрометеорологический моніторинг посевов сельскохозяйственных культур в Украине с применением аэрокосмических методов / *В.С. Антоненко*. – К. : АртЭк, 2002. – 308 с.
5. *Лялько В.И.* Опыт комплексирования многозональных снимков NOAA/AVHRR и "Landsat-7" для прогноза урожайности озимой пшеницы (на примере районов Киевской области) / *В.И. Лялько, А.И. Сахадский, Г.Н. Жолобак и др.* // Космічна наука і технологія. – 2003. – 9, № 4. – С. 99–103.
6. *Ничипорович А.А*. Фотосинтетическая деятельность растений и пути повышения их продуктивности / *А.А. Ничипорович* // Фотосинтез и продукционный процесс. – М. : Наука, 1972. – С. 511–527.
7. *Ruimy M.S.* Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely-sensed data / *M.S. Ruimy, B. Saugier, G. Dedieu* // J. Geophys. Res. – 1994. – D. 3. – P. 5263–5283.
8. *Benedetti R*. On the use of NDVI as a tool for agricultural statistics: the case studi of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna / *R. Benedetti, P. Rossini* // Remote Sens. Environ. – 1993. – 45. – P. 311–326.