

УДК 551.509

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ CGMS ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОСЕВОВ В УКРАИНЕ

А. А. Кривобок¹, А. О. Кривошеин¹, Т. И. Адаменко²

¹ Украинский гидрометеорологический институт,
03028, г. Киев, проспект Науки, 37, kryvoshein@uhmi.org.ua

² Украинский гидрометцентр, 01601 г. Киев, ул. Золотоворотская 6-В, adamenko@meteo.gov.ua

В статье рассматриваются особенности технологической адаптации системы CGMS (Crop Growth Monitoring System – Система мониторинга роста сельскохозяйственных посевов), а именно: создание метеорологической базы данных за период 2000–2017 гг., используя стандартные метеорологические наблюдения сети Украинского гидрометеорологического центра; создание базы данных почвенных характеристик, путем нахождения соответствия между таксономией почвенной карты Украины и классификацией почв WRB; создание баз данных фенологических характеристик и статистической урожайности на областном и районном уровнях. Кроме того, в статье рассматривается пространственная схематизация расчетов и агрегация показателей продуктивности сельскохозяйственных посевов, полученных в результате работы биофизической модели WOFOST (WOrld FOod STudies). Изложена схема прогноза урожайности сельскохозяйственных культур в разрезе административных единиц, а также проведена оценка точности прогноза урожайности озимой пшеницы в административных районах Киевской области.

Ключевые слова: система мониторинга; сельскохозяйственные культуры; характеристики продуктивности; биофизическое моделирование; прогноз урожайности; WOFOST; CGMS.

1. ВВЕДЕНИЕ

Украина занимает одно из ведущих мест в мире в области производства сельскохозяйственной продукции и экспорта продовольствия. По оценкам экспертов, потенциально, Украина может производить такое количество продовольствия, которым может обеспечить около 200 млн. человек, что в 5 раз превышает сегодняшнее население страны. Очевидно, что производство такого количества сельскохозяйственной продукции – это значительный экспортный потенциал страны, который требует не только достаточно высокого технологического уровня производства, но и современную государственную систему мониторинга состояния и прогноза урожайности основных сельскохозяйственных культур для принятия необходимых управленческих решений. Такая система позволит максимально быстро и эффективно оценивать изменения метеорологических условий, их влияние на развитие растительности, возможную урожайность, принятие мер для обеспечения продовольственной безопасности, поддержки производителей сельскохозяйственной продукции и проведения определенной маркетинговой поли-

тики на внешних рынках. В настоящее время одной из наиболее совершенных подобных систем является система CGMS, разработанная в Объединенном исследовательском центре ЕС (Испра, Италия). По оценкам, полученным [1], ошибка прогнозов урожайности по основным сельскохозяйственным культурам на европейском континенте с помощью данной системы за период 1975–1997 гг. была в пределах 3–5 %. В основном, эта система давала значительные ошибки прогноза урожайности на ранних стадиях вегетации и меньшие на поздних. Данная система положена в основу постоянно действующих проектов MARS-FOOD (Мониторинг урожайности для продовольственной безопасности), MARS-STAT (Сельскохозяйственная статистика), MARS-PAC (Поддержка общей сельскохозяйственной политики), поддерживаемых Европейской Комиссией.

Система CGMS состоит из биофизической модели WOFOST [2, 3], базы данных, которая включает метеорологические, агрометеорологические, статистические, почвенные геопространственные данные и статистическую модель прогноза урожайности. В общем, все ее составляющие объединены в несколько независимых мо-

дулей, представленные на рис. 1. В этой схеме указаны входные данные, а также выходная информация для каждого модуля, которая может быть использована как самостоятельный продукт для дальнейшего анализа. Учитывая, что данная система использует структурированную базу данных, что упрощает, в значительной степени, ее наполнение, она была адаптирована во многих странах мира для проведения мониторинга за состоянием сельскохозяйственных посевов [4-6]. В основном адаптация сводится к следующим шагам:

- создание базы метеорологических и фенологических данных, доступных для этой территории. База данных должна включать не менее 15 лет ежедневных наблюдений;
- создание базы данных по характеристикам почвы (как правило, используется наиболее точная почвенная карта для данной территории);
- калибровка агрометеорологической модели WOFOST;
- создание базы данных по урожайности сельскохозяйственных культур в масштабах административных единиц, доступных в местных статистических организациях;
- адаптация схемы прогноза урожайности сельскохозяйственных культур в разрезе административных единиц.
- технологическая адаптация программных средств для проведения расчетов системы.

Проведение соответствующих этапов адаптации позволит повысить точность определяемых характеристик развития сельскохозяйственных посевов на протяжении вегетационного периода для, практически, любого района земного шара.

Целью этой работы является описание технической и методологической адаптации системы CGMS в Украине.

2. ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Входными для этого модуля являются ежедневные срочные стандартные метеорологические данные в форматах WMO [7] с метеорологических станций Гидрометцентра Украины (рис. 2а). Эти данные включают измерения температуры, осадков, скорости ветра, высоты снежного покрова, бала облачности и температуры точки росы. В дальнейшем они трансформируются в суточные данные со следующим набором параметров: минимальная и максимальная температура, суммарное количество осадков, высота снежного покрова, средние значения скорости ветра, балла облачности и парциального давления водяного пара (P_a), которое рассчитывается по следующей формуле [8, 9]

$$P_a = P_s \times \frac{H}{100}, \quad (1)$$



Рис. 1 - Общая схема системы CGMS.

где P_s – давление насыщенного водяного пара, гПа;

$$P_s = 0.61121 \times \exp\left(\left(18.678 - \frac{T}{234.5}\right) \times \left(\frac{T}{257.14 + T}\right)\right)$$

для $T > 0$ °С;

$$P_s = 0.61115 \times \exp\left(\left(23.036 - \frac{T}{333.7}\right) \times \left(\frac{T}{279.82 + T}\right)\right)$$

для $T < 0$ °С;

$$H = 100 \times \frac{\exp\left(\frac{17.625 \times TD}{243.04 + TD}\right)}{\exp\left(\frac{17.625 \times T}{243.04 + T}\right)},$$

TD – значение температуры точки росы, °С;

T – значение температуры, °С;

H – значение относительной влажности воздуха, %.

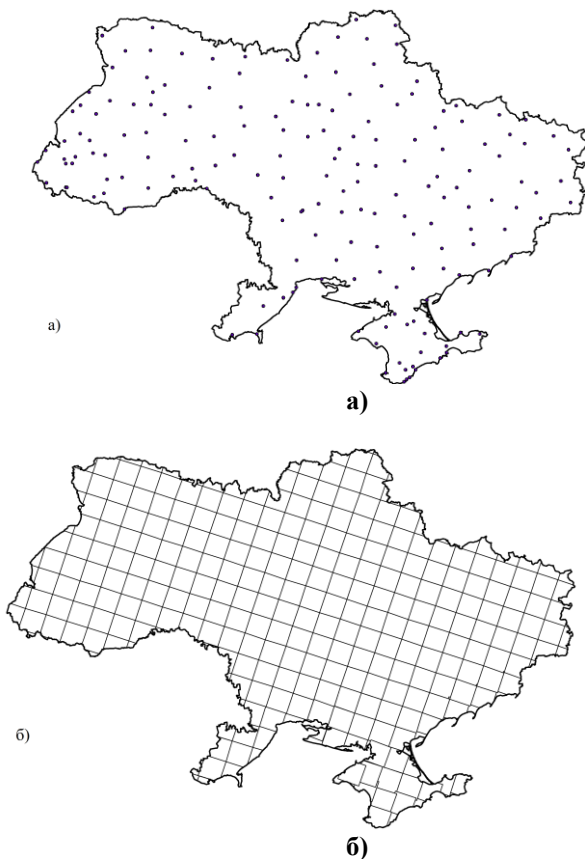


Рис. 2 - Расположение метеорологических станций Украинского гидрометцентра (а) и узлов регулярной сетки (б)

По среднесуточным данным рассчитываются значения солнечной радиации и испаряемость над водной, растительной и земной (свободной от растительности) поверхностями [10]. Суточ-

ные данные интерполируются в узлы регулярной сетки в азимутальной проекции Ламберта размером 50×50 км (рис. 2,б). Выбор размера узла регулярной сетки основывался на том, что метеорологические данные в его пределах изменяются незначительно [11-12]. Схема интерполяции состоит из двух шагов, первый - определение для станций, находящихся в радиусе 250 км от центра узла регулярной сетки, так называемой, меры «подобности» [13-14]. В основу расчета положена мера, которая учитывает расстояние от центра узла до метеорологической станции, высоту над уровнем моря, на которой расположена метеорологическая станция, расстояние до ближайшей морской поверхности станции и центра узла, а также расположение станции и центра узла относительно, так называемого «климатического барьера», например, горного массива. Мера «подобности» выражается в километрах, чем выше значение, тем менее подобны метеорологические условия на определенной станции и центра узла регулярной сетки. Окончательно, мера «подобности» рассчитывается следующим образом

$$SS = dist + D_{alt} + W_{alt} + D_d C_{scorr} + C_{lbn}, \quad (2)$$

где SS - мера подобности центра узла сетки относительно метеорологической станции, км; $dist$ - расстояние между центром узла сетки и метеорологической станцией, км; D_{alt} - абсолютная разница в высоте относительно уровня моря, м; W_{alt} - весовой фактор для D_{alt} км/м. Значение W_{alt} принимается 0.5 км/м и основано на предположении, что разница в высоте составляет 100 м на 50 километрах расстояния по горизонтали; $D_d C_{scorr}$ - абсолютная разница в расстоянии до ближайшей морской поверхности между центральной точкой узла регулярной сетки и метеорологической станцией, км; C_{lbn} - значение «климатического барьера», км.

Для интерполяции метеорологических данных в узлы регулярной сетки использовались измерения от одной до четырех станций. Для определения наиболее подходящего набора станций для интерполяции метеорологических данных рассчитывается суммарная мера «подобности» в соответствии с (1). Она основана на средних значениях мер «подобности» метеостанций. Окончательное выражение будет выглядеть следующим образом

$$SetScore = dist_{avg} + D_{alt_{avg}} \times W_{alt} + D_d C_{scorr_{avg}} + FnS \times Score_{min}, \quad (3)$$

где *SetScore* – оценка пригодности набора метеорологических станций по отношению к соответствующему центру ячейки сетки, км; *distavg* – среднее расстояние между центром узла сетки и метеорологической станцией, км; *Daltavg* – средняя абсолютная разница в высоте относительно уровня моря, м; *DdCstcorravg* – средняя абсолютная разница в скорректированном расстоянии до побережья, км; *FnS* – критерий, учитывающий число станций при интерполяции; *Score_{min}* – минимальное значение меры «подобности» для станций при интерполяции, км.

На втором шаге, после того, как был определен оптимальный набор метеорологических станций, для получения метеорологических параметров для каждого узла сетки, что выражается минимальной установленной оценкой, данные просто усредняются. Значение температуры и давления водяного пара корректируются на разницу в высоте между выбранной метеорологической станцией и центром ячейки климатической сетки. Для получения интерполированных данных по осадкам использовалась упрощенная схема [14], когда узлу регулярной сетки соответствуют осадки, выпавшие на станции, имеющей самое низкое значение меры «подобности».

Таким образом, были получены ежедневные интерполированные метеорологические данные в узлах сетки по всей территории Украины в период с 2000 до 2017 года.

3. ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для формирования базы фенологических данных были использованы стандартные фенологические наблюдения сети Украинского гидрометеорологического центра. Такие наблюдения проводятся на агрометеорологических станциях и постах по всей территории Украины. Всего наблюдения за посевами озимой пшеницы проводятся на 117, кукурузы – на 54, ярового ячменя – на 77, подсолнечника – на 70 и сои – на 23 станциях и постах. В число этих наблюдений входит даты сева, всходов и созревания сельскохозяйственной культуры. Так как в CGMS-Украина вся информация, как уже было отмечено ранее, представлена в узлах регулярной сетки, то все фенологические данные для каждой культуры были проинтерполированы в эти узлы. В качестве метода интерполяции был использован метод осреднения данных близлежащих, в радиусе 250 км от центра узла регулярной сетки, станций и постов. Таким образом были получены интерполированные фенологические данные

для узлов регулярной сетки за период с 2000 по 2015 годы. В дальнейшем используется подход, описанный в [15], в соответствии с которым определяется климатически оптимальная дата сева сельскохозяйственных культур.

4. ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПОЧВЫ

Данные почвенных характеристик являются одним из самых сложных источников информации для CGMS-Украина. Как правило, они получаются из различных баз данных почвенных характеристик и обрабатываются в соответствии с алгоритмами, описанными в [16]. От масштаба почвенной карты, которая берется за основу при формировании базы входных данных напрямую зависит количество элементарных расчетных единиц и необходимое время обработки. Информация о характеристиках почвы используется в CGMS-Украина двояко. Во-первых, она используется при моделировании, когда определяются влажность почвы и глубина залегания корневого слоя, а во-вторых – при определении пригодности типа почв для выращивания той или иной сельскохозяйственной культуры. Степень пригодности выражается в процентах от 0 до 100. Для территории Украины почти все типы почв пригодны для выращивания сельскохозяйственных культур, за исключением горных массивов и солончаков, находящихся на юге Херсонской области. В системе CGMS-Украина учитываются почвенные характеристики, связанные с ее водоудерживающей способностью. Такими характеристиками являются влажность завядания, полевая влагоемкость и максимальная влагоемкость, которые необходимы для расчетов влагообеспеченности сельскохозяйственных культур. Каждый тип почвы также характеризуется глубиной корневого слоя (*rooting depth*), которая оценивается с использованием, так называемых, педотрансферных функций (*Pedotranfer functions*) [17], когда по названию почвы в классификации WRB [18] (*World Reference Base* – международный стандарт классификации почв) и механическому составу оценивается глубина корневого слоя.

В качестве основной информации для заполнения базы данных системы использовалась оцифрованная почвенная карта Украины 1:2500000. На первом шаге было найдено соответствие между таксономией почвенной карты Украины и классификацией почв WRB [19, 20]. Из почвенной карты было извлечено 40 типов почв (табл. 1), которые использовались для

Таблица 1 - Соответствие между таксономией почвенной карты Украины и классификацией почв WRB

Классификация типов почв по WRB	Таксономия почвенной карты Украины
Podzoluvisols (PD)	
Stagnic (PDj)	Дерново-слабоподзолистые оглеенные (DSLO 3)
Eutric (Pde)	Дерново-слабоподзолистые песчаные и глинисто-песчаные (DSPG 1)
Gleyic (PDg)	Дерново - среднеподзолистые оглеенные (DSRO 4)
Gleyic (PDg)	Дерново-среднеподзолистые супесчаные (DSS 2)
Gleyic (PDg)	Дерново - средне и сильноподзолистые поверхностно - оглеенные (DSRPO 5)
Eutric (Pde)	Светло- серые и серые оподзоленные (YASS 6)
Gleyic (PDg)	Дерновые оподзоленные суглинистые (DOS 36)
Solonetz (SN)	
Haplic (SNh)	Солонцы (SS 33)
Chernozems (CH)	
Calcic (CHk)	Черноземы южные остаточные - солонцеватые (CHPZS 22)
Calcic (CHk)	Черноземы преимущественно солонцеватые на тяжелых глинах CHSG (18)
Calcic (CHk)	Черноземы и дерновые почвы щебневые на элювии безкарбонатных пород (сланцы) (CHDR 19)
Calcic (CHk)	Черноземы обычные малогумусные , а) мицеллярно - карбонатные (CHZMM 15)
Luvic (CHI)	Черноземы типичные остаточные - солонцеватые (CHPZS 21)
Haplic (CHh)	Черноземы обычные малогумусные маломощные , а) мицеллярно - карбонатные (CHZMK 16)
Haplic (CHh)	Черноземы типичные малогумусные (CHTM 11)
Haplic (CHh)	Черноземы типичные среднегумусные (CHTS, 12)
Haplic (CHh)	Черноземы обычные среднегумусные (CHZS 14)
Calcic (CHk)	Черноземы обычные мало - и среднегумусные мощные : а) мицеллярно - карбонатные (CHZM 13)
Haplic (CHh)	Черноземы реградируемые (CHR 10)
Haplic (CHh)	Черноземы южные малогумусные и слабо гумусованные : а) мицеллярно - карбонатные (CHPM 17)
Calcic (CHk)	Черноземы и дерновые карбонатные почвы на элювии карбонатных пород (мел) (CHDRK 20)
Phaeozems (PH)	
Haplic (PHh)	Лугово - черноземные и дерново - осолоделые (LCHDO 34)
Luvic (PHI)	Лугово - черноземные глубоко солонцеватые (LCHGS 25)
Luvic (PHI)	Лугово - черноземные поверхностно - солонцеватые (LCHPS 24)
Luvic (PHI)	Черноземы оподзоленные (CHO, 8)
Gleysols (GL)	
Mollic (GLm)	Луговые солонцеватые (LS 30)
Umbric (GLu)	Луговые (L 29)
Dystric (GLd)	Дерновые оглеенные песчаные со слабогумусовыми песками (DOP 35)
Mollic (GLm)	Лугово - болотные и болотные (LB 31)
Kastanozems	
Luvic (KSI)	Темно - каштановые остаточные - солонцеватые (TEMSZ 26)
Luvic (KSI)	Темно - каштановые солонцеватые (TEMSS 27)
Luvic (KSI)	Каштановые солонцеватые (KZS 28)
Cambisols (CM)	
Distric (CMd)	Бурые горно - лесные щебневые и дерново - буроземные (BGDB, 38)
Distric (SKe)	Дерново - буроземные и горно - луговые (DBG L, 39)
Chromic (CMx)	Коричневые горные щебневые (KG 40)
Eutric (CMe)	Буроземно - подзолистые и поверхностно - оглеенные (BPPO 37)
Greyzems (GR)	
Haplic (GRh)	Темно - серые оподзоленные (TEMS 7)
Haplic (GRh)	Темно - серые реградируемые (TEMSR 9)
Histosols (HS)	
Histosols (HS)	Торфяно - болотные (TB 32)

оценки глубины залегания корневого слоя на основе упоминавшихся ранее педотрансферных функций.

Следующим шагом было определение объемного содержания влаги в почве при максимальной влагоемкости (SAT), минимальной (WP) и полевой влагоемкости (FC) каждого типа почв с использованием информации, полученной из различных справочных материалов, опубликованных в Украине [21-23]. Эти характеристики влажности почвы представлены в виде вертикальных профилей гравиметрических масс (θ_m) каждые 10 см от поверхности до глубины 2,5 м. Для преобразования θ_m в объемное содержание влаги (θ_v) используется следующее уравнение

$$\theta_v = \theta_m \times \frac{P_t}{P_w}, \quad (4)$$

где P_t - объемная плотность почвы, P_w - плотность воды ($P_w = 1$).

Эти значения доступны для каждого типа почв в [23]. Таким образом SAT, WP и FC конкретных типов почв оцениваются как средние значения вертикального профиля:

$$\theta_{SAT} = \frac{\sum \theta_{SAT}^i}{n}, \quad (5)$$

$$\theta_{WP} = \frac{\sum \theta_{WP}^i}{n}, \quad (6)$$

$$\theta_{FC} = \frac{\sum \theta_{FC}^i}{n}, \quad (7)$$

где θ_{SAT}^i , θ_{WP}^i , θ_{FC}^i - объемное содержание влаги на определенной глубине почвы i , n - количество уровней.

5. КАЛИБРОВКА АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ WOFOST

Как уже указывалось ранее неотъемлемой частью системы CGMS-Украина является биофизическая модель WOFOST [24-27], которая используется для моделирования развития сельскохозяйственных посевов, т.е. расчета общей биомассы (кг/га), биомассы продуктивных органов (кг/га), индекса листовой поверхности, стадии развития и относительной влажности почвы. Для более корректного описания этого процесса в определенных географических районах необходимо проведение калибровки этой модели, т.е. адаптации ее для использования в указанных регионах. Адаптация предполагает нахождение определенных коэффициентов, используемых

для моделирования развития растений. Все коэффициенты в модели WOFOST делятся на две группы: одни, связанные с физическими процессами, происходящими в растениях, другие – с влиянием локальных факторов на развитие сельскохозяйственных культур. Для первой группы коэффициентов необходимо проведение, достаточно, сложных натуральных экспериментов, которые не рассматриваются в данной статье. Для второй группы коэффициентов, которые определяют фенологическое развитие и включают T_{SUMEM} (сумма температур от даты посева до всходов), T_{SUM1} (сумма температур от всходов до цветения) и T_{SUM2} (сумма температур от цветения до созревания), были рассчитаны эти значения по фенологическим данным, полученным с агрометеорологических постов и станций сети Гидрометцентра Украины за период 2000 – 2015 годы по пяти основным сельскохозяйственным культурам (озимая пшеница, кукуруза, яровой ячмень, соя и подсолнечник). В качестве примера в таблице 2 приведено количество наблюдений для расчета указанных коэффициентов для посевов озимой пшеницы.

Для оценки T_{SUMEM} мы оцениваем эффективную дневную температуру (T_{eff}), которая необходима для развития посевов с даты сева (ВВСН00) до всходов (ВВСН09). Эффективная суточная температура рассчитывается как

$$T_{eff} = T - T_{base}, \quad (8)$$

где $T_{base} = 0$ °C для посевов озимой пшеницы, $T_{base} = 10$ °C для посевов кукурузы, $T_{base} = 0$ °C для посевов ярового ячменя, $T_{base} = 7$ °C для посевов сои, $T_{base} = 3$ °C для посевов подсолнечника.

Значения коэффициентов T_{SUM1} и T_{SUM2} рассчитываются как сумма T_{eff} от стадии всходов растений (ВВСН09) до цветения (ВВСН65) и от ВВСН65 до стадии созревания (ВВСН89), соответственно.

$$T_{sum} = \sum_{i=1}^d T_{eff}, \quad (9)$$

где d – день года, который соответствует конкретной стадии фенологического развития,

$$T_{eff} = \begin{cases} 0, & T < T_{base} \\ T - T_{base}, & T_{base} \leq T \leq T_{effmx} \\ T_{effmx}, & T > T_{effmx} \end{cases}, \quad (10)$$

Таблица 2 - Фенологические данные, которые используются для расчета значений T_{SUMEM} , T_{SUM1} , T_{SUM2} для посевов озимой пшеницы за период 2000-2015 г.

Область	Число станций, постов	Фаза фенологического развития (ВВСН коды [28])				Число наблюдений
		00	09	65	89	
Черкасская	6	00	09	65	89	168
Черновицкая	2	00	09	65	89	29
Черниговская	3	00	09	65	89	43
Днепропетровская	6	00	09	65	89	193
Донецкая	8	00	09	65	89	235
Житомирская	2	00	09	65	89	43
Ивано-Франковская	2	00	09	65	89	39
Киевская	5	00	09	65	89	131
Крым	11	00	09	65	89	206
Волынская	4	00	09	65	89	93
Львовская	5	00	09	65	89	102
Луганская	7	00	09	65	89	156
Николаевская	8	00	09	65	89	184
Одесская	9	00	09	65	89	254
Полтавская	6	00	09	65	89	100
Ровенская	2	00	09	65	89	40
Сумская	4	00	09	65	89	90
Тернопольская	4	00	09	65	89	101
Винницкая	5	00	09	65	89	118
Харьковская	7	00	09	65	89	183
Херсонская	7	00	09	65	89	156
Хмельницкая	5	00	09	65	89	128
Закарпатская	2	00	09	65	89	30
Запорожская	6	00	09	65	89	124

где T_{effmx} – максимальная эффективная температура для развития посевов (для озимой пшеницы, кукурузы, ячменя; $T_{effmx} = 30$ С, подсолнечника $T_{effmx} = 32$ С и сои $T_{effmx} = 22$ С).

Для озимой пшеницы T_{SUMEM} и T_{SUM1} рассчитываются с фактической даты сева, учитывая осенние условия развития. Такой подход отличается от того, как рассчитывается T_{SUM1} , например, в CGMS-Eurore в Объединенном центре JRC, где моделирование начинается с 1 января и не учитывает условия роста осенью. Рассчитанные значения T_{SUM1} , T_{SUM2} для каждого узла географической сетки, для посевов озимой пшеницы по территории Украины, в качестве примера, представлены на рис. 3-4.

6. СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПО УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР, ДОСТУПНЫХ В МЕСТНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ОРГАНИЗАЦИЯХ

Для оценки урожайности сельскохозяйственных культур в Украине была создана база данных по урожайности и площадям посевов (областные и районные данные) уже упоминавших-

ся пяти сельскохозяйственных культур за период 2000 – 2017 годы. Эти данные были получены из областных и районных управлений статистики Государственной службы статистики Украины. Эта база данных состоит из 46350 записей, каждая из которых включает информацию об урожайности сельскохозяйственной культуры, площадях посевов и источник получения данных.

7. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СХЕМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ И АГРЕГАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОСЕВОВ

Одной из основных особенностей системы CGMS-Украина является возможность получения достоверных характеристик продуктивности сельскохозяйственных культур в масштабах страны, области, района путем учета метеорологических и почвенных неоднородностей в масштабах выделенных административных единиц. Для этого территория Украины делится на, так называемые, таксоны, которые являются условно однородными по метеорологическим и почвенным характеристикам и принадлежащими

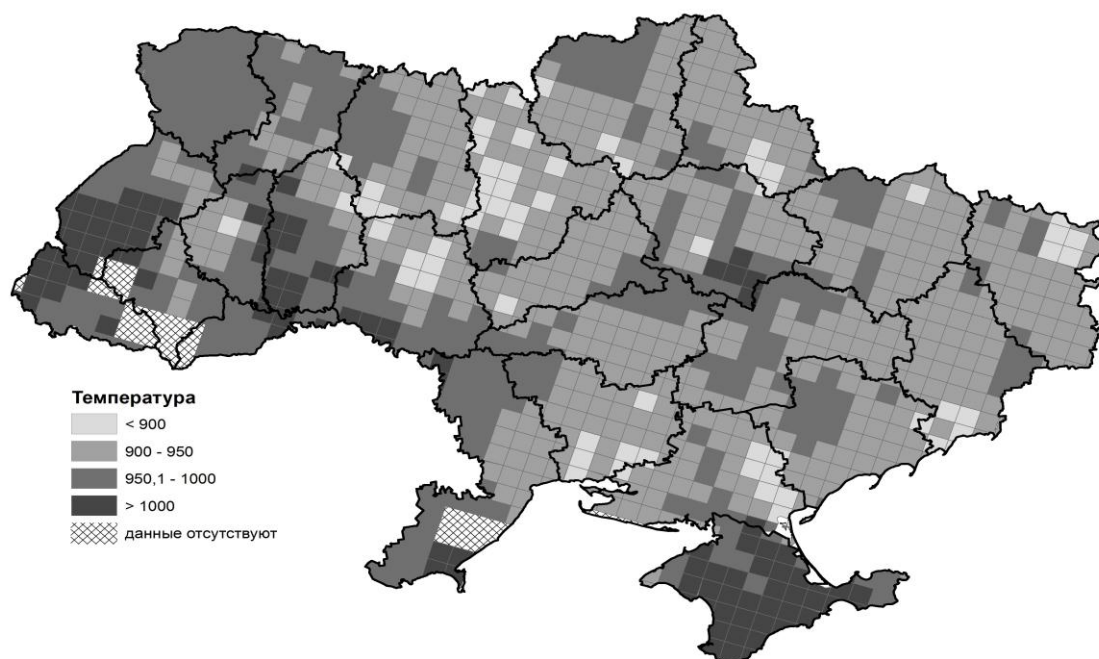


Рис. 3 - Рассчитанные значения T_{SUM1} в узлах регулярной сетки



Рис. 4 - Рассчитанные значения T_{SUM2} в узлах регулярной сетки

к определенной административной единице. Это сделано в связи с тем, что для расчета характеристик продуктивности используется одномерная модель WOFOST. При таком подходе, смоделированные индикаторы продуктивности определенной сельскохозяйственной культуры являются репрезентативными для однородной

территориальной единицы и отличаются от характеристик продуктивности этой культуры в других метеорологических и почвенных условиях. Кроме того, поскольку параметры продуктивности используются в статистической подсистеме прогнозирования урожайности, то они должны быть обобщены и на уровне админи-

стративных единиц. В расчетной схеме CGMS-Украина используются такие таксономические единицы: узел регулярной сетки (GRID) – таксономическая единица с однородными климатическими (погодными) условиями, геометрическим центром которого является узел регулярной климатической сетки; SMU – таксономическая единица с однородным почвенным покровом; NUTS – административная территориальная единица: NUTS-0 – государственное административное деление; NUTS-1 – областное административное деление; NUTS-2 – районное административное деление; EMU – элементарная

картографическая единица, которая является результатом объединения всех рассмотренных таксонов в рамках которых моделируются характеристики продуктивности сельскохозяйственных культур (рис. 5).

Для выделения элементарных картографических единиц на территории Украины были использованы карта узлов регулярной сетки (50x50 км), карта почв в масштабе 1: 2500000 и карта административного деления Украины на уровне районов.

В результате наложения этих трех карт (рис. 6) было выделено 6913 EMU,

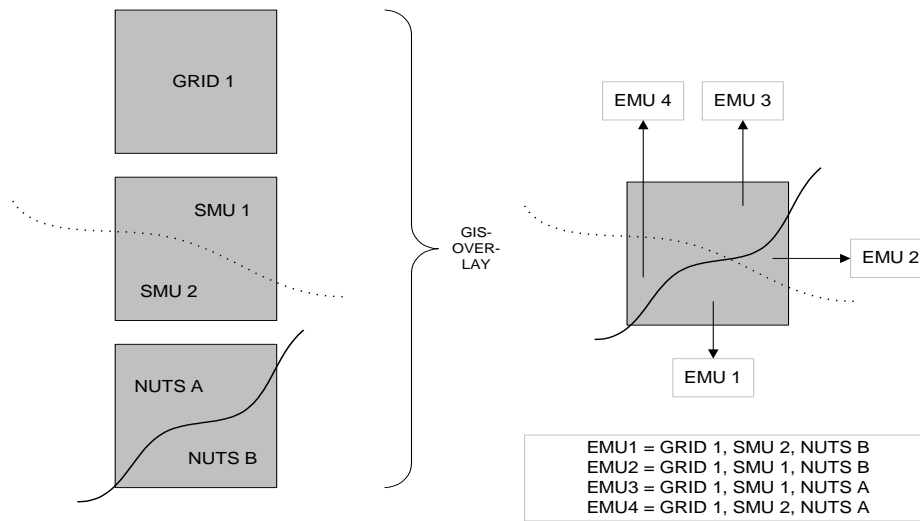


Рис. 5 - Схема выделения элементарных картографических единиц (EMU) [10].

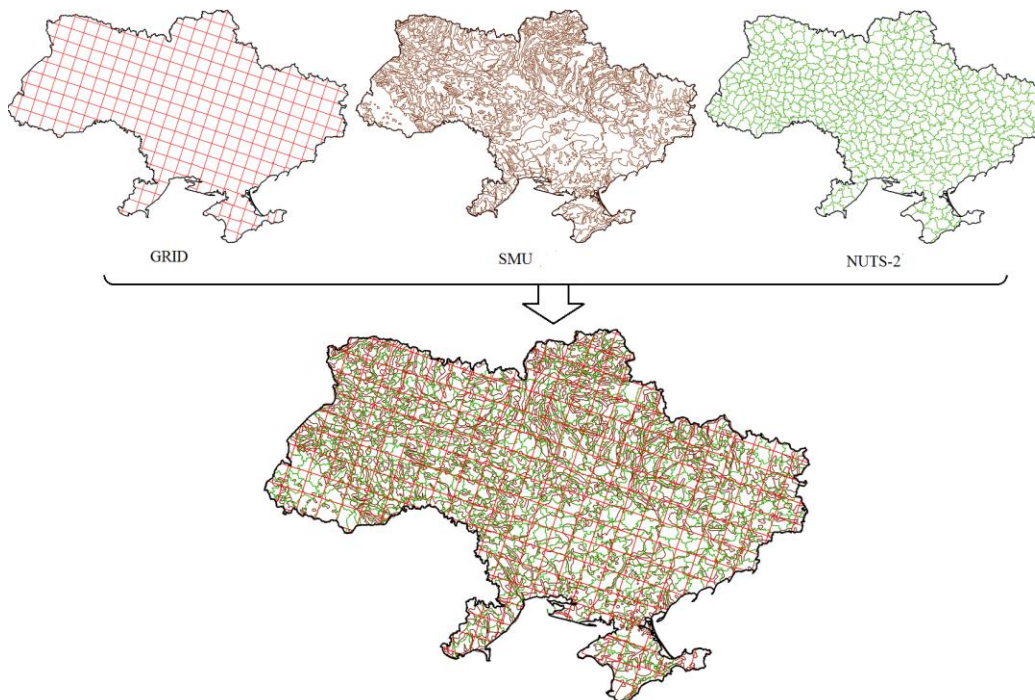


Рис. 6 - Схема выделения элементарных картографических единиц (EMU) для Украины

для каждого из которых и применяется точечная модель WOFOST. Затем параметры продуктивности сельскохозяйственных культур, рассчитанные для каждой EMU, агрегируются как на уровень узлов регулярной сетки, так и административных территориальных единиц (районов, областей, страны). Метод объединения (агрегации) отдельных EMU в узлы регулярной сетки основан на учете весового показателя каждой EMU в рамках данного узла. Весовой показатель EMU определяется отношением площади почв, пригодных для выращивания той или иной культуры в рамках данной EMU, к общей площади пригодных почв для этой культуры в рамках всего узла (по всем EMU). Объединение смоделированных параметров продуктивности сельскохозяйственных культур на административных территориальных уровнях осуществляется по тем же принципам.

Для территории административного района агрегированный показатель продуктивности определяется по формуле

$$Y_{N_2} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{E,i} \times A_{E,i} \times Y_{E,i}}{\sum_{i=1}^n C_{E,i} \times A_{E,i}}, \quad (11)$$

где Y_{N_2} – показатель продуктивности сельскохозяйственной культуры в границах административного района; Y_E – смоделированные показатели продуктивности в пределах EMU; A_E – площадь EMU; C_E – часть площади EMU, пригодной для выращивания данной культуры; n – количество EMU в границах административного района (NUTS-2).

По формуле (11) также могут быть получены агрегированные показатели продуктивности сельскохозяйственных посевов и на других территориальных уровнях – областном или страны в целом.

8. АДАПТАЦИЯ СХЕМЫ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В РАЗРЕЗЕ АДМИНИСТРАТИВНЫХ ЕДИНИЦ (РАЙОНОВ И ОБЛАСТЕЙ)

Как уже указывалось, в системе CGMS-Украина используется статистическая модель прогноза урожайности. Для этого используется подход, предложенный в [29, 30], в котором в качестве предикторов служат результаты биофизического моделирования роста сельскохозяйственных культур. Эти результаты не что иное,

как интегральная характеристика развития сельскохозяйственных культур в зависимости от метеорологических условий и почвенных характеристик, т.е. их влияние на урожайность этих культур. В таком случае окончательная урожайность может быть записана как [31]

$$Y_T = b_0 + f(T) + f(simulation) + e, \quad (12)$$

где $f(simulation)$ является функцией, описывающей вклад результатов биофизического моделирования роста сельскохозяйственных культур в зависимости от погодных условий в общую урожайность, т/га; $f(T)$ – технологический тренд как функция времени, т/га; e – остаточный член, не связанный с трендом, т/га; b_0 – значение урожайности без учета метеорологических факторов и тренда, т/га.

Следуя работе [32], уравнение (12) может быть переписано как

$$Y_T = b_0 + b_1 T + b_2 S_T, \quad (13)$$

где Y_T и S_T – оцениваемая урожайность и предикторы, полученные в результате биофизического моделирования, т/га; T , b_0 , b_1 и b_2 – постоянные регрессии; b_0 – константа представляющая собой среднюю официальную статистическую урожайность, т/га; b_1 – ежегодный технологический тренд урожайности, т/га; b_2 – константа, описывающая вклад метеорологических условий и изменяющаяся от 0 до 1.

Адаптация схемы прогноза, которая используется в CGMS-Украина, проводилась для всех областей и включала ранее упоминавшиеся пять сельскохозяйственных культур, которые составляют основной аграрный экспортный потенциал страны. Процесс адаптации состоял из следующих шагов:

1. выбор оптимальных предикторов для прогноза урожайности с использованием регрессионной модели;
2. сравнительный анализ точности прогноза урожайности по регрессионной модели с фактическими данными.

8.1 Выбор оптимальных предикторов для прогнозирования урожайности озимой пшеницы по регрессионным моделям

К параметрам биопроductивности посевов сельскохозяйственных культур относятся общая сухая биомасса, биомасса продуктивных органов растений, индекс площади поверхности листьев,

которые могут быть определены для двух типов расчетов – для достаточного и недостаточного увлажнения.

Для определения наиболее информативного предиктора используется метод наименьших квадратов, по которому определяется минимальная разница между спрогнозированной и фактической урожайностью.

Проведенные исследования показали, что наименьшая квадратическая ошибка наблюдалась при использовании в качестве предикторов индекса площади поверхности листьев при недостаточном увлажнении (WLAI) и сухой биомассы продуктивных органов в условиях недостаточного увлажнения (WLYS). Первый предиктор (WLAI) является более информативным в начальной фазе развития – до формирования продуктивных органов, а другой предиктор (WLYS) – в более поздние сроки, после начала формирования продуктивных органов.

8.2 Сравнительный анализ точности прогноза урожайности по регрессионной модели с фактическими данными

С использованием выше указанного предиктора было оценена точность прогноза озимой пшеницы по каждому району Киевской области за 2007 г. (в качестве примера). Для оценки были использованы следующие статистические характеристики:

а) относительная ошибка прогноза

$$APE = \frac{|Y_f - Y_T|}{Y_T} \times 100, \quad (14)$$

где Y_f – фактическая урожайность, т/га;

б) дисперсия ошибки

$$RMSE = \sqrt{\frac{(Y_f - Y_T)^2}{N}}, \quad (15)$$

где N – количество точек;

в) среднее отклонение между фактическими и прогностическими значениями урожайности

$$RES = \frac{(Y_f - Y_T)}{N}. \quad (16)$$

Относительная ошибка прогноза урожайности озимой пшеницы, составленного во второй декаде июня 2007 г. по административным районам Киевской области, варьирует в достаточно больших пределах, однако, в основном не превышает 20 % (табл. 3). Средняя относительная

ошибка равна 12 %.

В абсолютных значениях средняя квадратическая ошибка прогноза составила 0,33 т/га, что находится в допустимых границах точности прогнозирования, определенных для системы CGMS-Europe.

Наименьшая урожайность спрогнозирована в Иванковском (1,17 т/га) и Вышгородском (1,95 т/га) районах. В то время, фактическая урожайность была, соответственно 1,38 и 1,73 т/га.

Наибольшая урожайность спрогнозирована в Обуховском, Кагарлицком и Рокитнянском районах и составляла, соответственно, 4,52 т/га, 5,02 т/га и 4,58 т/га, фактическая урожайность в этих районах составила, соответственно, 4,09 т/га, 4,27 т/га и 4,09 т/га.

Таким образом, регрессионный метод прогноза урожайности озимой пшеницы, где в качестве предикторов использованы параметры продуктивности посевов, позволил получить удовлетворительные значения средней районной урожайности с месячной заблаговременностью.

9. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ СИСТЕМЫ CGMS-УКРАИНА

Технологическая адаптация системы заключалась в модификации и компиляции исходных кодов программы, написанных на языке программирования C++, компилятором Microsoft Visual C++ 6.0 в среде Windows 7, включая блок статистической обработки данных для прогнозирования урожайности использующий такие функции как линейная регрессия и сценарный анализ [33], который состоял из пакета программ MathPack Professional Edition (<http://www.lohninger.com/mathpack.html>) и представлен в виде специальной DLL библиотеки. Таким образом, были сформированы исполняющие файлы *CGMS.exe* и *CGMSBAT.exe*, которые вместе с базой данных могут работать как в интерактивном режиме, когда оператор может самостоятельно манипулировать параметрами для проведения расчетов, так и автоматическом, путем прописывания последовательности команд в *CGMS.ini* файле. В настоящее время в УкрГМИ действуют две версии этой системы, одна из которых использует районные статические данные по урожайности, а другая – областные. Различие в этих двух версиях также состоит в использовании различных элементарных расчетных единицах, которые зависят от принимаемого уровня административного деления.

Таблица 3 - Оценка точности прогноза урожайности озимой пшеницы в административных районах Киевской области 2007 г.

Административный район	Фактическая урожайность, т/га	Расчетная урожайность, т/га	Относительная погрешность прогноза, %
Барышевский	3.28	3.14	4
Белоцерковский	3.37	3.4	1
Богуславский	2.66	3.01	13
Бориспольский	3.21	3.13	2
Бородянский	2.47	2.33	6
Броварской	2.96	2.49	16
Васильковский	3.38	4.2	24
Володарский	3.75	4.01	7
Вышгородский	1.38	1.95	41
Згуровский	3.69	3.24	12
Иванковский	1.73	1.17	32
Кагарлицкий	4.27	5.02	18
Киево-Святошинский	3.51	4.01	14
Макаровский	1.95	2.28	17
Мироновский	3.24	4.03	24
Обуховский	4.09	4.52	11
Переяслав-Хмельницкий	2.89	2.9	0
Рокитнянский	4.09	4.58	12
Сквирский	2.99	3.23	8
Ставищенский	3.2	3.04	5
Таращанский	2.98	3.25	9
Тутаевский	2.99	3.1	4
Фастовский	3.2	3.12	3
Яготинский	3.87	3.65	6

Результаты работы системы CGMS-Украина доступны на web страничке <http://entln.uhmi.org.ua/case/CGMS>

10. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам проведенных исследований осуществлено методическую и технологическую адаптацию системы CGMS (Crop Growth Monitoring System - системы мониторинга условий роста и развития сельскохозяйственных культур и прогнозирования урожайности) для использования в Украине.

Для работы системы создана комплексная база входящих данных в формате MSAccess, которая включает метеорологическую, фитофенологическую, почвенную и статистическую информацию.

Метеорологическая информация состоит из интерполированных в сетку гридов 50×50 км ежедневных срочных стандартных метеоданных в форматах WMO, полученных из сети станций

Гидрометцентра Украины.

Фитофенологическая информация включает множество биологических коэффициентов растений, а также дату сева, всходов и созревания сельскохозяйственных культур, которые были получены в результате полевых исследований и наблюдений на агрометеорологических станциях и постах по всей Украине.

В качестве почвенной информации использовалась оцифрованная карта почв в масштабе 1:2500000 с предварительно проведенной согласованностью между таксономией Украины и классификацией почв WRB. Из почвенной карты извлечено 40 типов почв, характеристики которых были вовлечены в процесс моделирования, а именно глубина залегания корневого слоя и параметры влажности (наименьшая полевая влагоемкость, точка увядания и пр.).

Статистическая информация получена из областных и районных управлений Государственной службы статистики Украины и состоит из 46350 записей, в которых указаны урожайность

и площади посевов озимой пшеницы, кукурузы, ячменя, подсолнечника и сои.

Выполнена пространственная схематизация для расчетов и дальнейшей агрегации показателей продуктивности сельскохозяйственных посевов, в результате которой выделено 6913 элементарных картографических единиц, для каждой из которых и применяется точечная модель WOFOST.

Адаптирована схема прогноза урожайности, которая базируется на модели регрессии и для которой определены оптимальные предикторы (индекс площади поверхности листьев WLAI в начальной фазе развития растений и биомасса продуктивных органов WLYS для более поздних сроков вегетации).

Проведена технологическая адаптация программных средств для проведения расчетов, которая заключалась в модификации и компиляции исходных кодов программы, написанных на языке программирования C++.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Genovese, G.P. (2001). Introduction to the MARS Crop Yield Forecasting System (MCYFS). *Meeting on 4 and 5 October 2001, Luxembourg*. Space Applications Institute, Joint Research Centre of the European Commission, Ispra, Italy, pp. 15.
- Keulen, H. van, Diepen, C.A. van. (1990). Crop growth models and agro-ecological characterization. In: A. Scaife (Ed.). *Proceedings of the first congress of the European Society of Agronomy*, 5-7 December, Paris, CEC, ESA, INRA, pp. 1-16.
- Keulen, H. van, Wolf, J. (Eds). (1986). *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops: Simulation monographs*. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Huang Qing, Chen Zhongxin, Wenbin Wu, Wit Allard, Teng Fei, Li Dandan. (2011). *China crop growth monitoring system-methodology and operational activities overview*, pp. 2961-2964. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6049837>
- El Aydam, M., Balaghi, R. Promising 2010-2011 crop season for winter cereals. (2011). *Mars Bulletin: Crop monitoring in Morocco, Special Issue*, 19(1).
- Buffet, D., Dehem, D., Wouters, K., Tychon, B., Oger, R., Veroustater, F. (1999). *Adaptation of the European Crop Growth Monitoring System to the Belgian Conditions*. URL: <https://www.researchgate.net/deref/cgms.cragx.fgov.be> (accessed at 05.07.2017)
- Код для оперативной передачи данных приземных гидрометеорологических наблюдений. *Википедия:веб-сайт*. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/KH-01> (дата обращения 07.07.2017)
- Buck, A.L. (1981). New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *J. Appl. Meteorol.*, 20, 1527-1532.
- Alduchov, O.A., Eskridge, R.E. (1996). Improved Magnus' form approximation of saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteorol.*, 35, 601-609.
- CGMS Version 9.2, *User Manual and Technical Documentation draft*. (2003). Institute for the Protection and Security of the Citizen (IPSC/JRC) & Alterra - Wageningen University and Research Centre.
- Beek, E.G. (1991). *Spatial interpolation of daily meteorological data. Theoretical evaluation of available techniques. Report 53.1*. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, pp. 43.
- Diepen, C.A. van. (1998). Application of simple interpolation methods in agrometeorology. In: B. Gozzini, M. Hims (Eds). *Proceedings of workshop on dealing on spatialisation, 24-25 September, 1996, Toulouse*. EUR 18473 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, pp. 3-17.
- Goot, E. van der. (1998). Spatial interpolation of daily meteorological data for the Crop Growth Monitoring System (CGMS). In: M. Bindi, B. Gozzini (Eds). *Proceedings of seminar on data spatial distribution in meteorology and climatology, 28 September - 3 October, 1997, Volterra, Italy*. EUR 18472 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, pp. 141-153.
- Goot, E. van der. (1997). *Technical description of interpolation and processing of meteorological data in CGMS*. Joint Research Centre of the European Commission, Ispra, Italy.
- Savin, I. et al. (2007). *Climatically Optimal Planting Dates. JRC Scientific and Technical Report*. p. 57.
- New soil information for CGMS (Crop Growth Monitoring System) (SINFO). Final report*. (2005). Alterra - Wageningen University and Research Centre and INRA.
- King, D. et al. (1995). The EU soil geographic database. In: D. King, R.J.A. Jones, A.J. Thomasson (Eds). *European land information systems for agro-environmental monitoring*. EUR 16232 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, pp. 43-60.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations*. (2017). FAO Soils portal. URL: <http://www.fao.org/soils-portal> (accessed at 26.07.2017)
- Stolbovoy, V., Montenerella, V., Medvedev, V. (2001). New soil information for MARS Crop Yield Forecasting System, JRC, 2006. Integration of data soil information in Russia, Belorussia, Ukraine and Moldova in soil data base of Europe. *Pedology*, 7, 772-790.
- Медведев В. Опыт использования международной почвенной классификации в Украине. *Бюллетень аграрных наук*. 1999. № 1. С. 11-18.
- Атлас почв Украины / под ред. Н.Г. Крупского, Н.И. Полупана. Киев: Урожай, 1978. 160 с.
- Справочник по агрохимическим и агроэкологическим свойствам почв в Украине / под ред. Б.С. Носко, Б.С. Пристер, М.В. Лободы. Киев: Урожай, 1994. 333 с.
- Йовенко Н. Г. Водно-физические свойства и водный режим почв в УССР. Ленинград: Гидрометиздат, 1960. 350 с.
- Diepen, C.A. van. (1997). *Delivery CGMS version 5.1*. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.
- Diepen, C.A. van, Rappoldt, C., Wolf, J., Keulen, H. van. (1988). *Crop growth simulation model WOFOST. Documentation version 4.1. for World Food Studies*. Wageningen, The Netherlands.
- Diepen, C.A. van, Wolf, J., Keulen, H. van. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5(1), 16-24.
- Boogaard, H.L. et al. (1998). *WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Technical Document 52*.

- DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.
28. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. (2001). In: Uwe Meier (Ed.). *BBCB Monograph. 2nd ed.* Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, p. 158.
 29. Vossen, P. (1990). Comparative statistical validation of two ten-day water use models and three reduction hypotheses for yield assessments in Botswana. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51, 177-195.
 30. Vossen, P. (1995). Early crop production assessment of the European Union, the systems implemented by the MARS-STAT project. In: J.F. Dallemand, P. Vossen (Eds). *Workshop for Central and Eastern Europe on agrometeorological models: theory and applications in the MARS project, 21-25 November 1994, Ispra, Italy.* EUR 16008 EN, Office for Off. Publ. of the EU, Luxembourg, pp. 21-51.
 31. Vossen, P. (1992). Forecasting national crop yields of E.C. countries: the approach developed by the agriculture project. In: F. Toselli, J. Meyer-Roux (Eds). *Proceedings of conference on the application of remote sensing to agricultural statistics, 26-27 November 1991, Belgirate, Italy.* EUR 14262 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, pp. 159-176.
 32. Vossen, P., Rijk, D. (1995). *Early crop yield assessment of the EU countries: the system implemented by the Joint Research Centre.* EUR 16318 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg.
 33. Boogaard, H. et al. (2002). *METAMP. Methodology Assessment of MARS Predictions Description of the MARS Crop Yield Forecasting System, December 2002.*
- REFERENCES**
1. Genovese, G.P. (2001). Introduction to the MARS Crop Yield Forecasting System (MCYFS). *Meeting on 4 and 5 October 2001, Luxembourg.* Space Applications Institute, Joint Research Centre of the European Commission, Ispra, Italy, pp. 15.
 2. Keulen, H. van, Diepen, C.A. van. (1990). Crop growth models and agro-ecological characterization. In: A. Scaife (Ed.). *Proceedings of the first congress of the European Society of Agronomy, 5-7 December, Paris, CEC, ESA, INRA,* pp. 1-16. .
 3. Keulen, H. van, Wolf, J. (Eds). (1986). *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops: Simulation monographs.* Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
 4. Huang Qing, Chen Zhongxin, Wenbin Wu, Wit Allard, Teng Fei, Li Dandan. (2011). *China crop growth monitoring system-methodology and operational activities overview,* pp. 2961-2964. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6049837>
 5. El Aydam, M., Balaghi, R. Promising 2010-2011 crop season for winter cereals. (2011). *Mars Bulletin: Crop monitoring in Morocco, Special Issue,* 19(1).
 6. Buffet, D., Dehem, D., Wouters, K., Tychon, B., Oger, R., Verouster, F. (1999). *Adaptation of the European Crop Growth Monitoring System to the Belgian Conditions.* Available at: <https://www.researchgate.net/deref/cgms.cragx.fgov.be> (accessed at 05.07.2017)
 7. Wikipedia. (2017). *Code for the operational data transmission of surface hydrometeorological observations.* Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/KH-01> (accessed 07.07.2017). (in Russ)
 8. Buck, A.L. (1981). New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *J. Appl. Meteorol.*, 20, 1527-1532
 9. Alduchov, O.A., Eskridge, R.E. (1996). Improved Magnus' form approximation of saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteorol.*, 35, 601-609
 10. *CGMS Version 9.2, User Manual and Technical Documentation draft.* (2003). Institute for the Protection and Security of the Citizen (IPSC/JRC) & Alterra - Wageningen University and Research Centre.
 11. Beek, E.G. (1991). *Spatial interpolation of daily meteorological data. Theoretical evaluation of available techniques. Report 53.1.* DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, pp. 43.
 12. Diepen, C.A. van. (1998). Application of simple interpolation methods in agrometeorology. In: B. Gozzini, M. Hims (Eds). *Proceedings of workshop on dealing on spatialisation, 24-25 September, 1996, Toulouse.* EUR 18473 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, pp. 3-17.
 13. Goot, E. van der. (1998). Spatial interpolation of daily meteorological data for the Crop Growth Monitoring System (CGMS). In: M. Bindi, B. Gozzini (Eds). *Proceedings of seminar on data spatial distribution in meteorology and climatology, 28 September - 3 October, 1997, Volterra, Italy.* EUR 18472 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, pp. 141-153.
 14. Goot, E. van der. (1997). *Technical description of interpolation and processing of meteorological data in CGMS.* Joint Research Centre of the European Commission, Ispra, Italy.
 15. Savin, I. et al. (2007). *Climatically Optimal Planting Dates. JRC Scientific and Technical Report.* p. 57.
 16. *New soil information for CGMS (Crop Growth Monitoring System) (SINFO). Final report.* (2005). Alterra - Wageningen University and Research Centre and INRA.
 17. King, D. et al. (1995). The EU soil geographic database. In: D. King, R.J.A. Jones, A.J. Thomasson (Eds). *European land information systems for agro-environmental monitoring.* EUR 16232 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, pp. 43-60.
 18. *Food and Agriculture Organization of the United Nations.* (2017). FAO Soils portal. Available at: <http://www.fao.org/soils-portal> (accessed at 26.07.2017)
 19. Stolbovoy, V., Montenerella, V., Medvedev, V. (2001). New soil information for MARS Crop Yield Forecasting System, JRC, 2006. Integration of data soil information in Russia, Belorussia, Ukraine and Moldova in soil data base of Europe. *Pedology*, 7, 772-790.
 20. Medvedev, V. (1999). [Experience of using the international soil classification in Ukraine]. *Byulleten agrarnykh nauk [Bulletin of Agrarian Sciences]*, 1, 11-18. (in Russ)
 21. Krupskiy, N.G., Polupan, N.I. (Eds). (1978). *Atlas pochv Ukrainy [Atlas of Soils of Ukraine].* Kiev : "Urozhai". (in Russ)
 22. Nosko, B.S., Prister, B.S., Loboda, M.V. (Eds). (1994). *Spravochnik po agrokhimicheskim i agroekologicheskim svoystvam pochv v Ukraine [Manual on agrochemical and agroecological properties of soils in Ukraine].* Kiev : "Urozhai". (in Russ.)
 23. Yovenko, N.G. (1960). *Vodno-fizicheskiye svoystva i vodnyy rezhim pochv v USSR [Water-physical properties and water regime of soils in the Ukrainian SSR].* Leningrad : Gidrometizdat. (in Russ).
 24. Diepen, C.A. van. (1997). *Delivery CGMS version 5.1.* DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.
 25. Diepen, C.A. van, Rappoldt, C., Wolf, J., Keulen, H. van.

- (1988). *Crop growth simulation model WOFOST. Documentation version 4.1. for World Food Studies*. Wageningen, The Netherlands.
26. Diepen, C.A. van, Wolf, J., Keulen, H. van. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5(1), 16-24.
27. Boogaard, H.L. et al. (1998). *WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Technical Document 52*. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.
28. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. (2001). In: Uwe Meier (Ed.). *BBCB Monograph. 2nd ed.* Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, p. 158.
29. Vossen, P. (1990). Comparative statistical validation of two ten-day water use models and three reduction hypotheses for yield assessments in Botswana. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51, 177-195.
30. Vossen, P. (1995). Early crop production assessment of the European Union, the systems implemented by the MARS-STAT project. In: J.F. Dallemand, P. Vossen (Eds). *Workshop for Central and Eastern Europe on agrometeorological models: theory and applications in the MARS project, 21-25 November 1994, Ispra, Italy*. EUR 16008 EN, Office for Off. Publ. of the EU, Luxembourg, pp. 21-51.
31. Vossen, P. (1992). Forecasting national crop yields of E.C. countries: the approach developed by the agriculture project. In: F. Toselli, J. Meyer-Roux (Eds). *Proceedings of conference on the application of remote sensing to agricultural statistics, 26-27 November 1991, Belgirate, Italy*. EUR 14262 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, pp. 159-176.
32. Vossen, P., Rijks, D. (1995). *Early crop yield assessment of the EU countries: the system implemented by the Joint Research Centre*. EUR 16318 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg.
33. Boogaard, H. et al. (2002). *METAMP. Methodology Assessment of MARS Predictions Description of the MARS Crop Yield Forecasting System, December 2002*.

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ АДАПТАЦІЇ СИСТЕМИ CGMS ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПОСІВІВ В УКРАЇНІ

О. А. Кривобок¹, О. О. Кривошеїн¹, Адаменко Т. І.²

¹ Український гідрометеорологічний інститут,
03028, м. Київ, проспект Науки, 37, kryvoshein@uhmi.org.ua

² Український гідрометцентр
01601, м. Київ, вул. Золоторітська 6-В, adamenko@meteo.gov.ua

Система моніторингу росту рослин (CGMS) – одна з найсучасніших систем моніторингу умов росту та розвитку сільськогосподарських культур та прогнозування їхньої врожайності в агрометеорологічній практиці. CGMS дозволяє оцінити умови росту, розвитку та накопичення продуктивної біомаси для значного переліку сільськогосподарських культур – озимої пшениці, ячменю, кукурудзи, рису, соняшнику, картоплі, сої та ін. Для кожної культури система повинна бути адаптована в межах певної території з урахуванням метеорологічної, фенологічної, ґрунтової та біологічної інформації. У статті розглядаються особливості технологічної адаптації системи CGMS (системи моніторингу умов росту і розвитку сільськогосподарських культур), а саме: створення метеорологічної бази даних за період 2000-2017 рр., використовуючи стандартні метеорологічні спостереження мережі УкрГМЦ; створення бази даних ґрунтових характеристик, шляхом знаходження відповідності між таксономією ґрунтової карти України і класифікацією ґрунтів WRB; створення бази даних фенологічних характеристик, таких як T_{SUMEM} (сума температур від дати посіву до сходів), T_{SUM1} (сума температур від сходів до цвітіння) і T_{SUM2} (сума температур від цвітіння до стиглості), що були розраховані за даними, отриманими з агрометеорологічних постів і станцій мережі Гідрометцентру України за період 2000-2015 роки по п'яти основних сільськогосподарських культурах (озима пшениця, кукурудза, ярий ячмінь, соя і соняшник); створення бази даних статистичної врожайності на обласному та районному рівнях. Крім того, в статті розглядається просторова схематизація розрахунків і агрегація показників продуктивності сільськогосподарських посівів, отриманих в результаті роботи біофізичної моделі WOFOST. Викладена схема прогнозу врожайності сільськогосподарських культур в розрізі адміністративних одиниць, а також проведена оцінка точності прогнозу врожайності озимої пшениці в адміністративних районах Київської області. Створена web-сторінка результатів оперативної роботи системи CGMS-Україна <http://entln.uhmi.org.ua/case/CGMS>

Ключові слова: система моніторингу; сільськогосподарські культури; показники продуктивності; біофізичне моделювання; прогноз врожайності; WOFOST; CGMS.

PECULIARITIES OF TECHNOLOGICAL ADAPTATION OF THE CGMS SYSTEM FOR AGRICULTURAL CROPS MONITORING IN UKRAINE

O. A. Kryvobok¹, O. O. Kryvoshein¹, T. I. Adamenko²

¹ Ukrainian Hydrometeorological Institute,
37 Nauki av., 03028, Kyiv, Ukraine, kryvoshein@uhmi.org.ua

² Ukrainian Hydrometeorological Center
6 Zolotovoritska str., 01601, Kyiv, Ukraine, adamenko@meteo.gov.ua

The Crop Growth Monitoring System (CGMS) is one of the most advanced systems of monitoring the conditions of crops growth and development and forecasting their yields in agrometeorological practice. The CGMS allows to assess the conditions of growth, development and accumulation of productive biomass of a number of agricultural crops - winter wheat, barley, maize, rice, sunflower, potatoes, soybean etc. For each of the crops the system must be adapted to specific territories taking into account meteorological, phenological, biological information and soil characteristics. The paper discusses the peculiarities of technological adaptation of the CGMS system (Crop Growth Monitoring System) including creation of a meteorological database for the period of 2000-2017 using standard meteorological observations of the Ukrainian Hydrometeorological Center (UkrHMC) network; creation of a soil characteristics database by finding a correspondences of taxonomy of the soil map of Ukraine (scale:1:2500000) to classification of soils of the WRB; creation of a database of phenological characteristics such as T_{SUMEM} (sum of temperatures within the period from sowing to coming-up), T_{SUM1} (sum of temperatures within the period from coming-up to blossoming) and T_{SUM2} (sum of temperatures within the period from blossoming to maturity) calculated according to the data obtained from agrometeorological posts and stations of the UkrHMC network for the period of 2000 - 2015 with regard to five main crops (winter wheat, maize, spring barley, soybean and sunflower); creation of a statistical crop capacity database at the regional and district levels. In addition, the paper considers spatial schematization of calculations and aggregation of agricultural crops productivity indicators obtained as a result of the WOFOST biophysical model application. It also outlines the scheme of crop capacity forecasting based on administrative units and the estimation of forecast accuracy for winter wheat crop capacity in administrative districts of Kiev region. The link to the website containing results of operation of the CGMS-Ukraine system is as follows: <http://entln.uhmi.org.ua/case/CGMS>

Keywords: monitoring system, agricultural crops, productivity indicators, biophysical modeling, crop capacity forecast, WOFOST, CGMS.

Подання до редакції : 20. 02. 2018
Надходження остаточної версії : 18. 05. 2018
Публікація статті : 29. 11. 2018