

УДК 630:551.5.517.11

Канд. геогр. наук С.С. Байшолоанов\*

Д.К. Байбазаров \*

**АДАПТАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ А.Н. ПОЛЕВОГО ДЛЯ ПРОГНОЗА УРОЖАЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ  
КАЗАХСТАНА**

*УРОЖАЙНОСТЬ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АДАПТАЦИЯ, ПРОГНОЗ,  
СРЕДНЕМНОГОЛЕТНИЕ ДАННЫЕ, АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ  
УСЛОВИЯ*

*В статье рассматривается вопрос среднесрочного прогнозирования урожайности зерновых культур, который занимает одно из центральных мест в агропродовольственной политике страны и программах развития сельскохозяйственных предприятий. Даны методологические рекомендации по прогнозированию аграрного производства на региональном уровне.*

Одной из основных задач, решаемых в департаменте агрометеорологии РГП «Казгидромет», в целях обслуживания сельского хозяйства республики, является анализ текущих агрометеорологических условий и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур. Однако данная задача усложняется тем, что большинство используемых методов агрометеорологических прогнозов и оценок морально устарели, не охватывают некоторые виды сельскохозяйственных культур и мероприятий в сельскохозяйственном производстве. Проблемы агрометеорологии в Казахстане и пути ее решения были обозначены в работе [1]. Соответственно возникла необходимость в усовершенствовании имеющихся методик и адаптации современных моделей и прогностических технологий ведущих стран мира для условий Казахстана.

Сегодня в ведущих странах мира для прогноза урожайности сельскохозяйственных культур успешно используются некоторые расчетные модели. Например, модель DSSAT Геррита Хугенбума (США) – Система поддержки принятия решений для передачи агротехнологий. Она представляет собой комплект программного обеспечения, включающий данные о почве, фено-

---

\* Казгидромет, г. Алматы

типе зерновых культур, погоде и средствах управления, с помощью которых моделируется рост и урожайность зерновых культур. Пакет DSSAT включает более 27 различных культур.

Модель CropSyst (Модель воспроизведения системы земледелия) позволяет имитировать суточный рост различных видов зерновых культур. Она является аналитическим инструментом для изучения влияния систем управления на урожайность сельскохозяйственных культур и окружающую среду.

В странах СНГ широко используется динамическая модель формирования урожая сельскохозяйственных культур проф. А.Н. Полевого (Украина). Динамическая модель проф. А.Н. Полевого позволяет воспроизвести эффект воздействия агрометеорологических условий на основные показатели фотосинтетической деятельности посевов и реально оценить степень этого воздействия. Модель оценивает агрометеорологические условия произрастания сельскохозяйственных культур и прогнозирует их урожайность.

В качестве теоретической основы при создании модели использовались методологические принципы моделирования условий внешней среды на продуктивность сельскохозяйственных культур. Ключевым моментом является создание базовой длиннопериодной модели продукционного процесса растений. Продукционный процесс растений можно представить как взаимодействие совокупности физиологических процессов, конечным результатом которых является урожай. Формирование урожая рассматривается как развивающийся во времени процесс. В основу моделирования продукционного процесса положено описание «поведения основных физиологических процессов (фотосинтеза, дыхания, роста и распределения ассимилянтов)» в зависимости от складывающихся метеорологических условий. Моделирование продукционного процесса сводится к определению прироста общей биомассы и биомассы отдельных органов растений за определенные интервалы времени [2, 3].

В данной модели используются суточные, осредненные по декадам данные. Также имеются модификации модели по видам входящей информации, например, без входных данных по запасам влаги в почве, без входных данных по продолжительности солнечного сияния, но с входными данными по облачности и т.д.

Модель может быть адаптирована для всех почвенно-климатических зон, где возделываются сельскохозяйственные культуры. Базовую модель можно отрегулировать для большинства сельскохозяйственных культур. На-

пример, на Украине модель реализована для яровой и озимой пшеницы, ярового ячменя, гороха, подсолнечника, кукурузы и сахарной свеклы. Модель в различных модификациях используется в производственной деятельности гидрометеорологических служб Украины, России, Белоруссии, Молдавии.

В Казахстане модель была адаптирована в начале 2010 года в департаменте агрометеорологии РГП «Казгидромет», при поддержке профессора А.Н. Полевого, Байшолановым С.С. и Байбазаровым Д.К. Адаптация проведена для 3-х областей (Акмолинской, Северо-Казахстанской и Костанайской), на долю которых приходится 76 % от республиканского валового сбора зерновых (по пшенице 83 %) и зернобобовых культур. Территория данных областей охватывает несколько почвенно-климатических зон, поэтому адаптация модели проводилась по административным районам (всего для 45 районов). Она заключалась в приведении вычислительной системы модели в соответствие с почвенно-климатическими и агрономическими нормами, а также нормами по урожайности яровой пшеницы, за период 1999...2009 гг.

Адаптированная версия модели прошла производственные испытания, по результатам которых были введены дополнительные корректировки. В 2010 году оправдываемость прогноза урожайности, составленного по модели для яровой пшеницы, с заблаговременностью 1,5 месяца (на основе фактических данных за первые 4...5 декад вегетации) составила 85 %. При нулевой заблаговременности (на основе заполненных фактическими метеоданными всех декад, от всходов до восковой спелости), расчетные значения урожайности значительно приблизились к фактическим.

В 2011 году средняя по трем областям оправдываемость прогноза составила 80 %.

Базовая модель реализована на языке Visual Fortran и работает с помощью файлового менеджера Total Commander, на платформе Microsoft Windows. В 2011 году программистами РГП «Казгидромет» модель была переписана на языке Borland Builder C++ 5.0.

Структурно модель состоит из пяти блоков:

1. Блок входной агрометеорологической информации;
2. Блок расчета начальных данных и шкалы времени;
3. Блок факторов внешней среды;
4. Биологический блок;
5. Блок расчета ожидаемой урожайности.

Первый блок делится на пять групп:

1. описание района, области;
2. характеристика начального состояния посевов;
3. среднемноголетняя агрометеорологическая информация;
4. текущая агрометеорологическая информация конкретного года;
5. параметры модели.

Для проведения расчетов необходимы следующие средние многолетние декадные агрометеорологические и метеорологические данные (за период вегетации культуры):

- запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы, мм;
- запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы, мм;
- средняя за декаду температура воздуха, °С;
- сумма осадков за декаду, мм;
- средний за декаду дефицит влажности воздуха, мб;
- среднее за декаду число часов солнечного сияния, час;
- среднее за декаду количество облаков (общая и нижняя), баллы.

Остальные параметры модели (агрономические, биологические) были введены при адаптации модели к условиям вышеуказанных районов и областей.

Блок факторов внешней среды (третий) содержит три подблока:

- 3.1 – расчет радиационного и водно-теплового режимов посевов;
- 3.2 – расчет функции влияния температуры и влагообеспеченности посевов на фотосинтез;
- 3.3 – расчет комплекса оценок: условий формирования урожая в периоды выхода в трубку, выход в трубку – колошение, колошение – восковая спелость, потерь урожая за счет засухи, полегания посевов, стекания зерна.

Биологический блок (четвертый) включает пять подблоков:

- 4.1 – расчет онтогенетических кривых фотосинтеза и дыхания;
- 4.2 – расчет фотосинтеза, дыхания и прироста растительной массы;
- 4.3 – расчет ростовых функций периода вегетативного и репродуктивного роста;
- 4.4 – расчет динамики биомассы органов;
- 4.5 – расчет площади листовой поверхности.

Результаты расчетов выдаются в виде таблиц.

Последовательно за каждую декаду расчетного периода выводится семь расчетных таблиц:

Таблица «R.1.» содержит значения абсолютно сухой биомассы (г/м<sup>2</sup>) – листьев (ml), стеблей (ms), корней (mr), колосьев (mp), зерна (mq) по декадам вегетации (dek – номер расчетной декады от всходов; cyt – число дней от всходов). Пример таблицы «R.1.», рассчитанный по яровой пшенице, приведен в табл. 1. Расчет ведется до восковой спелости, соответственно количество декад для условий Казахстана может составить от 8 до 10.

Таблица 1

Таблица «R.1.» Сухая биомасса органов растений, г/м<sup>2</sup> (пример)

dek	cyt	ml	ms	mr	mp	mq
1	8	2,905	0,041	4,064	0	0
2	18	7,717	0,186	5,912	0	0
3	28	23,041	1,364	12,382	0	0
4	38	59,833	21,002	45,147	2,122	0
5	48	79,180	94,431	84,694	26,471	15,6
6	59	73,805	137,613	100,853	118,131	82,692
7	69	67,417	132,068	102,374	145,067	101,547
8	76	67,417	132,068	102,374	145,067	101,547

Таблица «R.2.» содержит значения:

- площади листьев (LL, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>);
- средней за декаду суточной суммы суммарной солнечной радиации (q, кал/см<sup>2</sup> сутки);
- средней за декаду эффективной температуры (ts1, °C);
- суммы эффективных температур нарастающим итогом (ts2, °C);
- средней за декаду интенсивности фотосинтеза при оптимальных условиях тепло- и влагообеспеченности (f0l, мг CO<sub>2</sub>/дм<sup>2</sup> час);
- средней за декаду интенсивности фотосинтеза в реальных условиях среды (ftl, мг CO<sub>2</sub>/дм<sup>2</sup> час);
- прироста за декаду абсолютно сухой растительной массы всего посева (DM, г/м<sup>2</sup> декада).

Таблица «R.3.» содержит характеристики влагообеспеченности и функции влияния факторов среды на фотосинтез:

- суммарное испарение (eakt, мм);
- испаряемость (epot, мм), их отношения (otwlag);
- величину ГТК (GTK, отн.ед.);
- обобщенную функцию влияния влагообеспеченности на фотосинтез (obob. funkz. vl. wlagi, отн. ед.);

- первую обобщенную функцию влияния термического режима и влагообеспеченности на фотосинтез (Ftw1, отн. ед.);
- вторую обобщенную функцию влияния термического режима и влагообеспеченности на фотосинтез с учетом коррекции на уровень температуры воздуха (Ftw2, отн. ед.).

Таблица «R.4.» содержит:

- значения средней за декаду температуры воздуха ( $t_s$ , °C);
- значения нижней (TOP1, °C) и верхней (TOP2, °C) границ оптимальных для фотосинтеза температур;
- оценку влияния температуры на фотосинтез ( $ksifl$ , отн. ед.);
- вычисленные значения запасов влаги в метровом слое почвы ( $W_0$ , мм);
- значения верхней ( $W_{opv}$ , мм) и нижней ( $W_{opn}$ , мм) границ оптимальной для фотосинтеза влажности почвы;
- оценку влияния влажности почвы на фотосинтез, вычисленную на основе рассчитанных значений влагозапасов ( $qamf$ , отн. ед) и фактических влагозапасов ( $qamf_1$ , отн. ед).

Таблица «R.5.» содержит сведения об оценке влияния агрометеорологических условий различных периодов вегетации, а также экстремальных факторов на формирование урожая:

- оценку влияния условий периода выхода в трубку на формирование числа зерен (символ печати – «form. chisl. zeren», отн. ед.);
- оценку по длительности периодов выход в трубку – колошение («vixod trubk – kolos», отн. ед.) и колошение – восковая спелость («kolos – vosk. spel.», отн. ед.);
- оценку влияния условий увлажнения по ГТК за периоды выход в трубку – колошение («ozenka GTK trubk.– kolos», отн. ед.) и колошение – восковая спелость («ozenka GTK kolos – vsk. sp.», отн. ед.);
- оценку влагообеспеченности посевов («wлагообеспеченност», отн. ед.), оценку возникновения и влияния засухи («zasuxa», отн. ед.);
- оценку полегания посевов («poleganie posev», отн. ед.) и стекания зерна («stekanie zerna», отн. ед.).

Таблица «R.6.» содержит итоговую оценку агрометеорологических условий формирования урожая и прогноз урожайности:

- итоговую оценку условий формирования урожайности в период от возобновления вегетации до выхода в трубку («v.v. – tr.», отн. ед.), от вы-

- хода в трубку до колошения («tr. – kol.», отн. ед.), от колошения до восковой спелости («kol. – v.sp.», отн. ед.);
- итоговую ожидаемую оценку условий формирования урожайности в период от возобновления вегетации до восковой спелости («Itofovaj», отн. ед.);
  - рассчитанную без учета указанных выше комплексных оценок урожайность (Уг0, ц/га);
  - прогнозируемые значения урожайности с учетом комплексных оценок агрометеорологических условий периода вегетативного роста (Уг13а, ц/га);
  - прогнозируемые значения урожайности с учетом комплексных оценок влияния неблагоприятных условий периода репродуктивного роста (Уг14а, ц/га);
  - прогнозируемое значение урожайности зерна с учетом итоговой комплексной оценки условий формирования урожая за полный период вегетации (Уг15b, ц/га).

Таблица «R.7.» содержит сводные данные об оценке условий формирования урожая по периодам вегетации и прогнозируемых значений урожайности. Пример таблицы «R.7.» приведен в табл. 2, где ГТК – гидротермический коэффициент Селянинова.

Таблица 2

Таблица «R.7.» Сводные данные по оценке агрометеорологических условий и прогнозу урожайности (пример)

№	Показатель	Значение
1	Оценка формирования числа зерен	0,959
2	Оценка длительности периода «выход в трубку-колошение»	0,926
3	ГТК2 периода «выход в трубку – колошение»	0,589
4	Оценка условий по ГТК2 периода «выход в трубку-колошение»	0,800
5	Оценка по длительности периода «колошение – восковая спелость»	0,941
6	ГТК3 периода «колошение – восковая спелость»	0,808
7	Оценка условий по ГТК3 периода «колошение – восковая спелость»	0,900
8	Оценка потерь за счет засухи и суховеев	0,775
9	Оценка потерь за счет полегания	1,000
10	Оценка потерь за счет стекания зерна	1,000

№	Показатель	Значение
11	Оценка периода «всходы – колошение»	0,929
12	Оценка периода «колошение – восковая спелость»	0,774
13	Итоговая оценка «всего периода вегетации»	0,851
14	Оценка условий текущей декады по сравнению со средним многолетним условием (с нормой)	75,654
15	Итоговая оценка всех текущих декад по сравнению со средними многолетними условиями	82,082
<b>ПРОГНОЗ УРОЖАЙНОСТИ</b>		
16	УРОЖАЙ при 14 % влажности зерна с учетом оценки по сравнению с оптимальными условиями, ц/га	11,545
17	УРОЖАЙ по тренду, ц/га	15,325
18	УРОЖАЙ по тренду с учетом оценки по сравнению со средними многолетними условиями, ц/га	12,583

В регионах с дефицитом влаги (или другого лимитирующего фактора) используется прогнозное значение под №18, а в регионах с условиями близкими к оптимальным – прогнозное значение под №16.

Данную адаптированную модель можно использовать не только для оценки и прогноза текущего состояния (в оперативной деятельности), но и для оценки влияния изменения климата на зернопроизводство республики, а именно для прогноза агроклиматических условий формирования продуктивности яровой пшеницы и прогноза ее урожайности в условиях будущего измененного климата.

Относительно слабым моментом данной модели является то, что в расчетной схеме урожайности слабо представлена технология возделывания культуры. Она учитывается только косвенно, а именно, модель базируется на осредненной за последние 10 лет технологии возделывания пшеницы. Но это обстоятельство не занижает достоинство модели. Модель рассчитывает ожидаемую урожайность культуры в будущем климате при условии сохранения технологии возделывания на современном уровне. Это дает возможность оценить успешность существующей технологии возделывания в условиях будущего климата. Надо отметить, что при коренном изменении технологии возделывания культуры в модель необходимо вводить соответствующие корректировки (повторная адаптация).

Применение модели в краткосрочном и долгосрочном прогнозировании отличается. Если при прогнозировании урожайности на текущий год используется прогнозное значение под №18, то при прогнозировании на десятилетия



вперед надо ориентироваться на значение под №16 (табл. 2), так как средние многолетние условия (нормы) могут меняться в последующем климатическом периоде. При этом урожайность №16 необходимо рассчитывать по современным и будущим климатическим нормам и сопоставлять их, т.е. показателем является не само значение урожайности, а величина ее изменения, обусловленная только климатическими факторами.

Также ценным в модели является оценка благоприятности климатических условий вегетационного периода для формирования продуктивности яровой пшеницы (показатели таблицы «R.7»). Особенно информативными являются оценочные характеристики под № 4, 8, 11, 12, 13. Оценка осуществляется сравнением значений этих показателей, рассчитанных по современным и ожидаемым климатическим нормам.

С помощью модели также можно решить некоторые агротехнические задачи. Например, можно определить необходимость передвижки сроков сева в условиях будущего климата. Начиная расчеты на декаду раньше или позже можно оценить передвижение сроков сева и выбрать оптимальные.

Модель А.Н. Полевого была использована при составлении Второго национального сообщения по изменению климата (2007...2008 гг.). Тогда адаптация модели была проведена по области в целом, что дало слишком обобщенную картину. При этом возможно, прогнозировалось само значение урожайности, а не ее изменение. Также не использовались возможности модели по оценке агроклиматических условий в период роста и развития яровой пшеницы.

Преимуществом вышеприведенного подхода является то, что он снимает погрешность, связанную с различием уровня культуры земледелия, что и является основным и важным аспектом в определении влияния изменения климата на зернопроизводство республике.

Для проведения расчетов по модели нужно вводить следующие параметры, рассчитанные по современным и будущим (ожидаемым) климатическим нормам:

1. средняя за декаду температура воздуха, °С;
2. сумма осадков за декаду, мм;
3. средний за декаду дефицит влажности воздуха, гПа.
4. запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы, мм;
5. запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы, мм;

При этом данные заносятся индивидуально по каждому административному району 3-х северных областей, по существующим метеорологическим станциям.

Значения первых 3 параметров для будущего климата прогнозируются на основе существующих моделей и сценариев изменения климата. Прогнозировать запасы продуктивной влаги в почве (4 и 5 параметры) пока не является возможным.

Данную проблему можно решить 2-я способами:

1) для условий современного и будущего климата в модель вводятся одни и те же данные, т.е. современные нормы запасов влаги в почве;

2) на основе многолетних статистических данных запасов влаги в почве, температуры и влажности воздуха и количества осадков по административным районам 3-х северных областей можно получить регрессионные уравнения, описывающие зависимость средних декадных значений запасов влаги от метеоданных. Регрессионные уравнения необходимо получить отдельно для различных типов почвы, за декады вегетационного периода яровой пшеницы (3 декада мая – 3 декада августа). При расчетах по модели, как для современных, так и для будущих ожидаемых климатических условий, в модель необходимо вводить рассчитанные по регрессионным уравнениям значения запасов влаги в почве (согласно соответствующим климатическим нормам температуры и осадков).

При получении достоверных регрессионных уравнений, соответственно по коэффициенту корреляции, по критериям Стьюдента и Фишера, необходимо выбрать второй способ.

Таким образом, адаптированную для 3-х зерновых областей Казахстана динамическую модель проф. А.Н. Полевого, с уверенностью можно использовать в оперативной деятельности РГП «Казгидромет», а также для исследования влияния изменения климата на сельское хозяйство республики. Остается добавить, что модель необходимо адаптировать и для других областей республики, а также при изменении технологии земледелия надо повторно провести её адаптацию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байшоланов С.С. О проблемах агрометеорологического прогнозирования в Казахстане // Вестник КазГУ, Серия географическая. Вып. 1(11). 2001. – С. 32-37.

2. Полевой А.Н., Русакова Т.И и др. Прикладная динамическая модель формирования урожая сельскохозяйственных культур. // Гидрометеорологическое обеспечение агропромышленного комплекса страны (Сб. докладов). – Л.: Гидрометеоиздат. – 1991. – С. 15-31.
3. Полевой А.Н. Методические указания по составлению прогнозов среднеобластной урожайности сельскохозяйственных культур на основе динамико-статистических моделей продуктивности (озимая пшеница, яровой ячмень, горох, подсолнечник, кукуруза и сахарная свекла). – Одесса, ОГМИ. – 1998. – 35 с.

Поступила 16.08.2012

Геогр. ғылымд. канд. С.С. Байшоланов  
Д.К. Байбазаров

**А.Н. ПОЛЕВОЙДЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛІН ҚАЗАҚСТАН  
ЖАҒДАЙЫНА БЕЙІМДЕП, АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҚ DAҚЫЛДАРЫ  
ӨНІМДІЛІГІН БОЛЖАУ ҮШІН ҚОЛДАНУ**

*Бұл мақалада мемлекеттік агротағамдық саясаттың және ауылшаруашылық өнеркәсіптерінің даму бағдарламаларының маңызды мәселесі болып табылатын дәнді дақылдар өнімділігінің орта мерзімдік болжау сұрақты қарастырылған. А.Н.Полевой моделін аймақтық деңгейде қолдану әдістемесі негіздері берілген.*