

ОПЫТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ*

Е.В. Федотова, Ю.А. Маглинец,

Р.В. Брежнев, А.И. Стародубцев

THE EXPERIENCE IN CROP YIELDS FORECASTING USING SIMULATION MODELS

Федотова Елена Викторовна – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. мониторинга леса Института леса СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск.

E-mail: elfed@ksc.krasn.ru

Маглинец Юрий Анатольевич – канд. техн. наук, проф., руководитель научно-учебной лаб. информационной поддержки космического мониторинга каф. систем искусственного интеллекта Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: maglinets@mail.ru

Брежнев Руслан Владимирович – канд. техн. наук, доцент научно-учебной лаборатории информационной поддержки космического мониторинга кафедры систем искусственного интеллекта Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: brejnev.ruslan@gmail.com

Стародубцев Александр Игоревич – магистрант базовой каф. геоинформационных систем Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: sss.sv.1995@mail.ru

Fedotova Elena Victorovna – Cand. Biol. Sci., Senior Staff Scientist, Lab. of Forest Monitoring, Institute of Forest SB RAS – Separate Division FRC KRC, Krasnoyarsk.

E-mail: elfed@ksc.krasn.ru

Maglinets Yury Anatolyevich – Cand. Techn. Sci., Prof., Head, Scientific and Educational Laboratory of Information Support of Space Monitoring, Chair of Systems of Artificial Intelligence, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

E-mail: maglinets@mail.ru

Brezhnev Ruslan Vladimirovich – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Prof., Scientific and Educational Laboratory of Information Support of Space Monitoring, Chair of Systems of Artificial Intelligence, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

E-mail: brejnev.ruslan@gmail.com

Starodubtsev Alexander Igorevich – Magistrate Student, Basic Chair of Geographic Information Systems, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

E-mail: sss.sv.1995@mail.ru

Проведен анализ компонентов и параметров имитационной модели биопродуктивности EP-IC для сельскохозяйственных условий центральной группы сельскохозяйственных районов Красноярского края. Для компонента модели EPIC«CropGrowthModel» выбраны источники информации с целью оценки ее параметров, характеризующих погодные условия. Доступ к картам полей с их координатами, сведениям о возделываемых культурах и данным дистанционного зондирования Земли осуществлен через сервис агромониторинга ИКИТ СФУ. Проведено моделирование параметров модели,

которые не измеряются на метеостанциях: суточная суммарная солнечная радиация, индекс листовой поверхности. Разработано программное обеспечение, реализующее ядро модели прогноза урожайности. Вычислены временные ряды суммарной суточной солнечной радиации и индекса листовой поверхности как функция вегетационного индекса нормированной разности NDVI для вегетационного периода 2018 года. Данные метеостанции Сухобузимское переработаны в формат, необходимый для работы модели: вычислены средняя, максимальная и минимальная дневные температу-

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Краевого фонда науки (проект № 18-47-242002 р мк).

ры, оценен индекс облачности. Проведено моделирование ежедневного прироста надземной биомассы сельскохозяйственных культур в зависимости от температуры воздуха в текущем вегетационном периоде. Результаты моделирования ежедневного прироста биомассы и сумма этих приростов за вегетационный период – надземная биомасса – согласуются с данными об урожайности, характерными для Сухобузимского района Красноярского края, – 23–24 ц/га. Для моделирования неблагоприятных погодных условий в модели используются коэффициенты стресса, которые имеют значения от 1 (наилучшие условия по данному фактору) до 0 (при данных значениях параметра культура не растет). Проведена демонстрация поведения модели в условиях недостатка влаги путем прямого построения ряда коэффициента водного стресса.

Ключевые слова: биопродуктивность, прогноз урожайности, EPIC.

The analysis of the components and parameters of the EPIC bioproductivity simulation model for agricultural conditions in the central group of agricultural districts of the Krasnoyarsk Region was made. For the component of the EPIC model "Crop Growth Model", the data sources were selected to evaluate its weather conditions parameters. The map of the fields with their coordinates, information about cultivated crops, as well as the access to remote distance Earth zonding sensing data was carried out through the agro-monitoring service ISIT SFU. Simulation model parameters usually not measured at meteorological stations – daily total solar radiation, leaf area index – was made. Software implementing the core of the yield forecast model was developed. The time series of the total daily solar radiation and leaf area index were calculated as a function of the normalized difference vegetation index NDVI for the vegetation period of 2018. The data from meteorological station 'Sukhobuzimskoye' were processed into the necessary for the model format: the average, maximum and minimum daily temperatures were calculated, and the cloud index was estimated. The simulation of daily increase in the aboveground biomass of crops depending on the air temperature in the current growing season was carried out. The simulation results of daily biomass growth and the sum of these growths during the growing season —

the aboveground biomass — were consistent with yield data characteristic of the Sukhobuzimo district of Krasnoyarsk Region – 23–24 c/hectare. For adverse weather conditions modeling, EPIC used stress coefficients having the values from 1 (the best conditions for this factor) to 0 (the culture does not grow at these parameter values). The demonstration of model behavior in conditions of lack of moisture by direct construction of a series of water stress coefficient was shown.

Keywords: bioproductivity, crop yield forecast, EPIC.

Введение. При решении задач оценки биопродуктивности сельскохозяйственных культур широко используются регрессионные и имитационные модели [1]. Регрессионные связи спектральных отражательных характеристик посевов с их фитомассой позволяют оценить урожайность [2]. Имитационные модели наиболее объективны, поскольку моделирование проводится на основе актуальных данных об условиях роста культуры. Однако эти модели являются наиболее трудоемкими на этапе параметризации и требуют определения большого количества параметров, представляющих характеристики культуры, почвы, погодные условия, многолетние средние метеорологические данные и др. [1].

Имитационная модель биопродуктивности EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) разработана в Техасской сельскохозяйственной научно-исследовательской лаборатории [3]. Раздел данной модели «Crop Growth Model» позволяет оценивать ежесуточный прирост надземной биомассы растений и таким образом делать прогноз урожайности, используя параметры роста культуры, метеорологические данные, характеристики почвы и др. (около 25 параметров).

Опыт применения модели EPIC представлен в ряде публикаций [4–8]. В каждом случае необходима адаптация модели для региональных условий, которая включает выбор источников метеорологических данных, моделирование параметров, которые не измеряются на метеостанциях (например, суточная суммарная радиация), а также активное использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В США такие параметры, как индекс листовой поверхности LAI, температура почвы и солнечная радиация, измерялись непосредственно в полевых услови-

ях. В приведенных работах для оценки LAI применяется вегетационный индекс нормированной разности NDVI, который рассчитывается по данным ДЗЗ, оценка доли фотосинтетически активной радиации ФАР осуществляется по модели, используя относительную влажность воздуха, максимальную суточную температуру почвы определяют по суммарной коротковолновой солнечной радиации, а минимальную – по эффективному излучению атмосферы [4], используются банки данных реанализа [8]. Проведены исследования поведения модели для условий Западной Сибири [6]. Авторы получили положительные результаты при оценке урожайности сельскохозяйственных культур в Алтайском крае, Тюменской и Новосибирской областях, включая программную реализацию модели [7].

Цель исследования. Анализ компонентов и оценка параметров EPIC для условий Сухобузимского района Красноярского края с использованием системы агромониторинга СФУ [9] и разработка программного компонента, реализующего базовую модель прогноза урожайности.

Модель прогнозирования урожайности. Адаптация модели для земледельческой части Красноярского края требует оценки многих параметров, имеющих региональные особенности и неизмеряемых на имеющихся метеостанциях.

Остановимся поподробнее на описании базовой части модели, сохраняя ее обозначения. Основная формула определения урожайности культуры имеет вид: $YLD = HI \times B_{AG}$, где B_{AG} – надземная биомасса, накопленная за вегетационный период; HI – индекс урожайности культуры, показывающий долю урожая в надземной биомассе растений в момент полного созревания [10].

Для прогнозирования урожайности вместо индекса HI используется текущий индекс $HI \times HIA_i$, где коэффициент HIA_i равен нулю в день сева и возрастает до 1 нелинейно в зависимости от суммы накопленных в течение сезона до дня i температур к моменту сбора урожая. Также в формуле учитывается температура, ниже которой культура не растет.

Суточный прирост биомассы определяется уравнением: $\Delta B = \Delta B_p \times REG$, где ΔB_p – потенциальный суточный прирост биомассы при оптимальных условиях для данной культуры, REG – регулятор прироста, минимальный коэффициент стресса среди всех используемых в модели

коэффициентов стресса (неблагоприятных факторов, например температуры воздуха, недостатка влаги, недостатка питательных веществ и пр.), то есть лимитирующий фактор в этот день.

Потенциальный прирост биомассы в день i определяется выражением: $\Delta B_{p,i} = 0,001 \times BE \times PAR_i \times (1 + \Delta HRLT_i)^3$, где BE – специфичный для культуры коэффициент конвертации энергии в биомассу, кг/мДж, $\Delta HRLT_i$ – изменение длины дня в день i , ч/день; PAR_i – фотосинтетически активная радиация в день i .

Фотосинтетически активная радиация в EPIC определяется выражением: $PAR_i = 0,5 RA_i \times (1 - e^{(-0,65LAI)})_i$, где RA_i – солнечная радиация в день i , мДж/м², LAI – индекс листовой поверхности, в данной работе вычисляется по зависимости от вегетационного индекса нормированной разности NDVI по данным дистанционного зондирования Земли.

Авторы работы для оценки потока суммарной (прямой и рассеянной) радиации RA_i воспользовались формулой Берлянда [11] и работами [12, 13]

$$Q_0 = \frac{S_0 \cdot \sinh_s}{1 + f \cdot \operatorname{cosech}_s}$$

где $S_0 = 1,98$ кал \times см² \times мин⁻¹ – солнечная постоянная; h_s – высота Солнца; f – коэффициент, зависящий от географической зоны и времени года.

Ввиду того, что на поток суммарной радиации оказывает существенное влияние облачность, используется формула

$$Q = Q_0 \times (1 - f \times n)$$

где n – индекс облачности (в долях единицы); f – эмпирический коэффициент, зависящий от географической широты местности [11]. Данная формула позволяет снизить относительную ошибку расчетов до 8–10 %.

Индекс листовой поверхности LAI рассчитывался по зависимостям от NDVI по данным дистанционного зондирования Landsat 8 OLI и Sentinel-2.

С формулами для расчета других компонентов приведенных соотношений можно ознакомиться в [10]. В таблице приведены значения и источники данных для входных параметров модели прогнозирования урожайности.

Результаты исследования и их обсуждение. Разработана программа на языке Python 3 для оценки ежедневного прироста надземной биомассы сельскохозяйственных культур. Кро-

ме данных таблицы использовались данные сервиса агромониторинга ИКИТ СФУ, в том числе карта полей и географические координаты поля, культура, выращиваемая на поле.

Входные данные модели

Данные, константы	Значение/Источник
Метеоданные: минимальная и максимальная температура воздуха, количество облаков, многолетние средние температуры воздуха	https://rp5.ru/
Сумма активных температур выше 5 °С	2000 °С
Минимальная температура роста	4 °С
Доля зерна в надземной биомассе	0,4
Коэффициент конвертации энергии в биомассу	30 кг/мДж
Индекс листовой поверхности LAI	Рассчитывается по данным ДЗЗ
Координаты поля/ей (широта и долгота, градусы)	Геосервис агромониторинга ИКИТ СФУ
Дата сева	Геосервис агромониторинга ИКИТ СФУ

Прогноз урожайности происходит следующим образом.

1. Пользователь вводит даты сева и текущую, указывает культуру и поле.

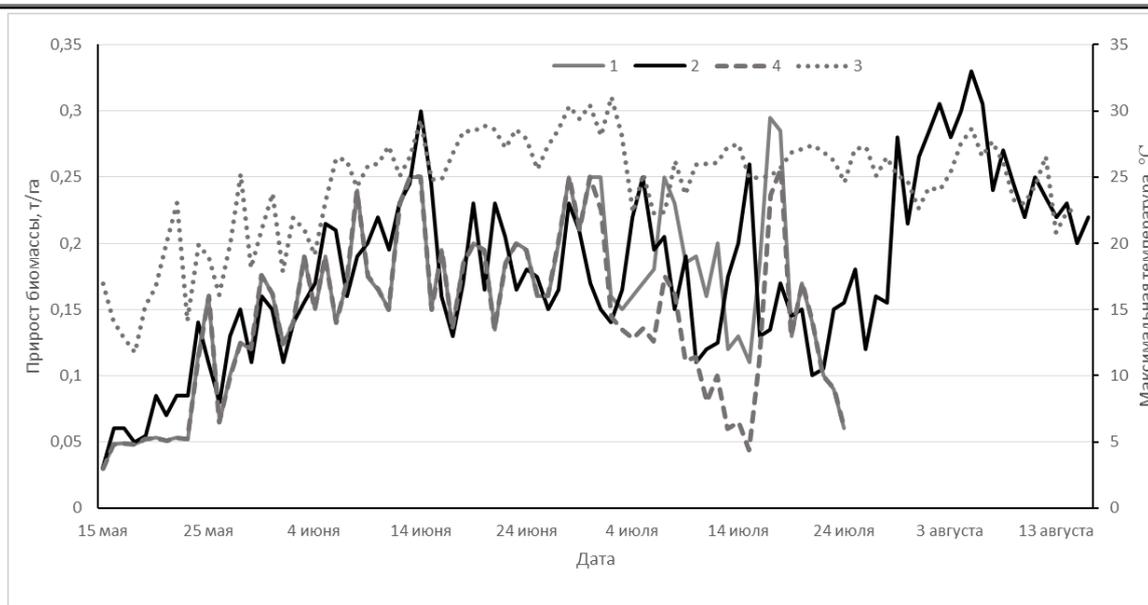
2. Рассчитывается урожайность YLD_i по данным из файла текущих метеоданных до указанной даты (в нашем случае это 20 июля), продолжая расчет до 15 августа по многолетним средним значениям.

Построение ряда NDVI и далее LAI на период с середины мая по конец сентября с временной дискретизацией в одну неделю, а также с учетом важных дат по фазам развития растений выполнено по данным ДЗЗ Landsat 8 OLI и Sentinel-2.

Урожайность (масса зерна), рассчитанная по усредненным многолетним погодным условиям к 15 августа 2018 г., составила 24,4 ц/га, прогноз-

ное значение, по данным 2018 г., равно 23,5 ц/га, что согласуется с данными [14, 15]. Графики среднемноголетнего хода ежедневного прироста биомассы культуры, прироста по погодным условиям 2018 г. приведены на рисунке.

Выводы. Модель демонстрирует увеличение прироста биомассы после появления всходов, затем прирост колеблется вокруг среднего уровня, реагируя на погодные условия. Поведение модели с учетом температурного и водного стрессов показано путем прямого введения ряда коэффициентов стресса. Для водного стресса смоделирована ситуация засушливого июля с коэффициентом стресса до значений 0,3, для остальных месяцев значение варьировалось от 0,5 до 1.



Прирост надземной биомассы: 1 – текущие данные 2018 г.; 2 – среднее многолетнее; 3 – максимальная суточная температура; 4 – модельные данные при водном стрессе

Литература

1. Савин И.Ю., Барталев С.А., Лулян Е.А. [и др.]. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 275–285.
2. Ивченко В.К., Демьяненко Т.Н., Ильченко И.О. [и др.]. Использование наземных спектрофотометрических измерений для выявления влияния приемов основной обработки почвы на процесс нарастания надземной фитомассы яровой пшеницы в зернопаропропашном севообороте // Вестник КрасГАУ. 2020. № 1. С. 3–11.
3. Williams J.R. The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC): Technical Reference // US Department of Agriculture. 1997. 235 с
4. Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Рычкова Н.В. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности // Известия Алтайского государственного университета. 2010. № 1. С. 89–93.
5. Евтюшкин А.В., Брыксин В.М., Рычкова Н.В. [и др.]. Верификация модифицированной модели продуктивности EPIC // Вестник Балтийского федерального университета. 2014. Вып. 4. С. 121–126.
6. Хворова Л.А., Топаж А.Г. Построение моделей агроэкосистем и их адаптация к конкретным условиям // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика, телекоммуникации и управление. 2011. № 1. С. 99–105.
7. Сладких Л.А., Захватов М.Г., Сапрыкин Е.И. [и др.]. Технология мониторинга состояния посевов по данным дистанционного зондирования Земли на юге Западной Сибири // Геоматика. 2016. № 2. С. 39–48.
8. Лысенко С.А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутникового мониторинга динамики углерода в наземных экосистемах // Исследование Земли из космоса. 2019. № 4. С. 48–59.
9. Brezhnev R.V., Maglinets Yu. A. Recognition of the Inhomogeneous Structure of Agricultural Object for Solving Agromonitoring Tasks // CEUR Workshop Proceedings. 2017. V. 2033. P. 247–251.
10. EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator. Model documentation // US Department of Agriculture. Technical Bulletin № 1768. 1990. 127 p.
11. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 752 с.
12. Еремин Д.И., Понятов Ю.А., Кемешева Д.Г. Выявление оптимального варианта разме-

- щения солнечной панели для повышения ее энергетических показателей // Новое слово в науке: перспективы развития: мат-лы междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары, 2014. С. 189–193.
13. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: учеб. пособие / под ред. В.В. Иванова. Изд. 2-е, испр. М.: Едиториал УРСС, 2004. 544 с.
 14. URL: https://rp5.ru/Погода_в_мире.
 15. URL: <https://agrovesti.net/news/indst/urozhaj-zernovykh-v-krasnoyarskom-krae-v-2018-godu-vyros-na-7-6.html>.
- Literatura**
1. Savin I.Ju., Bartalev S.A., Lupjan E.A. [i dr.]. Prognozirovanie urozhajnosti sel'skohozjajstvennykh kul'tur na osnove sputnikovyykh dannykh: vozmozhnosti i perspektivy // Sovremennyye problemy DZZ iz kosmosa. 2010. T. 7. № 3. S. 275–285.
 2. Ivchenko V.K., Dem'janenko T.N., Il'chenko I.O. [i dr.]. Ispol'zovanie nazemnykh spektrofotometricheskikh izmerenij dlja vyjavleniya vlijanija priemov osnovnoy obrabotki pochvy na process narastaniya nadzemnoy fitomassy jarovoy pshe-nicy v zernoparopropashnom sevooborote // Vestnik KrasGAU. 2020. № 1. S. 3–11.
 3. Williams J.R. The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC): Technical Reference// US Department of Agriculture. 1997. 235 s
 4. Bryksin V.M., Evtjushkin A.V., Rychkova N.V. Prognozirovanie urozhajnosti zernovykh kul'tur na osnove dannykh distancionnogo zondirovaniya i modelirovaniya bioproduktivnosti // Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo univ-ersiteta. 2010. № 1. S. 89–93.
 5. Evtjushkin A.V., Bryksin V.M., Rychkova N.V. [i dr.]. Verifikacija modifitsirovannoj modeli pro-dukтивности EPIC // Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta. 2014. Vyp. 4. S. 121–126.
 6. Hvorova L.A., Topazh A.G. Postroenie modelej agrojekosistem i ih adaptacija k konkretnym uslovijam// Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo poli-tehnicheskogo universiteta. Informatika, telekom-munikacii i upravlenie. 2011. № 1. S. 99–105.
 7. Sladkih L.A., Zahvatov M.G., Saprykin E.I. [i dr.]. Tehnologija monitoringa sostojanija posevov po dannykh distancionnogo zondirovaniya Zemli na juge Zapadnoj Sibiri // Geomatika. 2016. № 2. S. 39–48.
 8. Lysenko S.A. Prognozirovanie urozhajnosti sel'skohozjajstvennykh kul'tur na osnove sputnikovogo monitoringa dinamiki ugljeroda v nazemnykh jekosistemah // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2019. № 4. S. 48–59.
 9. Brezhnev R.V., Maglinets Yu. A. Recognition of the Inhomogeneous Structure of Agricultural Object for Solving Agromonitoring Tasks // CEUR Workshop Proceedings. 2017. V. 2033. P. 247–251.
 10. EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator. Model documentation // US Department of Agriculture. Technical Bulletin № 1768. 1990. 127 p.
 11. Matveev L.T. Kurs obshhej meteorologii. Fizika atmosfery. L.: Gidrometeoizdat, 1984. 752 s.
 12. Eremin D.I., Ponjatov Ju.A., Kemesheva D.G. Vyjavlenie optimal'nogo varianta razmeshhenija solnechnoj paneli dlja povysheniya ee ener-geticheskikh pokazatelej // Novoe slovo v nauke: perspektivy razvitija: mat-ly mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Cheboksary, 2014. S. 189–193.
 13. Kononovich Je.V., Moroz V.I. Obshhij kurs astro-nomii: ucheb. posobie / pod red. V.V. Ivanova. Izd. 2-е, ispr. M.: Editorial URSS, 2004. 544 s.
 14. URL: https://rp5.ru/Pogoda_v_mire.
 15. URL: <https://agrovesti.net/news/indst/urozhaj-zernovykh-v-krasnoyarskom-krae-v-2018-godu-vyros-na-7-6.html>.