

## УРОВНИ ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМ: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ С ПОЗИЦИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**Р. А. Полуэктов, И. В. Опарина, Е. Т. Захарова**

*ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии  
Гражданский проспект, 14, Санкт-Петербург, 195220  
E-mail: r\_poluektov@mail.ru*

*Поступила в редакцию 04 июня 2010 г., принята к печати 15 июля 2010 г.*

Классификация уровней продуктивности агроэкосистем рассмотрена с динамической точки зрения. Выделены три уровня продуктивности: потенциальная, лимитированная влагообеспеченностью и лимитированная азотным питанием. Показано, что продуктивность на каждом из трех уровней варьирует от года к году вокруг некоторого среднего уровня. Уровень, лимитированный почвенной влагой, отвечает продуктивности, достигаемой в случае применения технологии точного земледелия.

**Ключевые слова:** динамическая модель, продуктивность агроэкосистем, лимитирующие факторы.

### ВВЕДЕНИЕ

При планировании агротехнических мероприятий часто требуется оценить значимое достижимое урожая. Подобные оценки требуются, например, для расчета доз минеральных удобрений или для определения оросительных норм. В работах (Бондаренко и др., 1986; Жуковский, Усков, 1985) предложены методы получения таких оценок на основе использования обобщенных почвенно-климатических показателей, таких как коэффициент использования фотосинтетически активной радиации (ФАР), гидротермический коэффициент Селянинова и (или) бонитет почвы по Семенову. На этой основе там же выделены три уровня урожая – потенциальный, климатически обусловленный и действительно возможный урожай. Следует отметить, что эти и им подобные оценки носят статический характер и не учитывают вариабельности погодных условий в ходе вегетации. Являясь приближенными, они могут быть использованы лишь для грубой оценки уровня продуктивности агроэкосистемы.

В работах де Вита и Пеннинга де Фриза (Пеннинг де Фриз, 1986) приложена другая классификация уровней продуктивности. Оценки этих авторов являются динамическими и согласованы с модельным представлением о динамике продукционного процесса растений. В соответствии с этим потенциальная продуктивность (уровень I) означает,

что лимитирующими урожай факторами являются приход к посеву ФАР и температура воздуха. При этом влажность почвы и условия минерального питания являются оптимальными в течение всей вегетации. Почвенная влага является дополнительным лимитирующим фактором на уровне II, если при этом содержание азота в почве остается оптимальным. Это означает, что в течение некоторых частей вегетационного периода растения испытывают стресс от недостатка, а на других - от избытка почвенной влаги. Могут существовать такие условия, когда влажность почвы достигнет оптимальной величины, равной наименьшей влагоемкости (НВ). Тогда посев временно переходит на первый уровень продуктивности. Лимитирование по азоту приводит к уменьшению продуктивности и означает переход на уровень III. На этом уровне азот может лимитировать рост и развитие растений в течение всего периода вегетации, или его части. На некоторых отрезках времени азотное питание может быть достаточным. Тогда продукционный процесс временно переходит на второй, а быть может и на первый уровень. Эта классификация может быть продолжена. Однако авторам не известны модели, которые описывают продуктивность ниже третьего уровня.

Нетрудно видеть, что эта последняя классификация уровней продуктивности агроэкосистем значительно более содержательна, чем упомянутая ранее. Она является

динамической и указывает не только на источники, но и на механизмы лимитирования. Кроме того, она полностью согласуется с модельным описанием продукционного процесса. Иллюстрации этого последнего утверждения и посвящена настоящая статья.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является динамическая система «почва – растительный покров – приземный воздух». Задачей исследования является построение семейства динамических моделей, позволяющих описывать продукционный процесс сельскохозяйственных растений на трех уровнях продук-

тивности. Принципы моделирования описаны в многочисленных публикациях (например, Полуэктов и др., 2006) и мы здесь на них останавливаться не будем. Основное внимание будет уделено структуре моделей трех уровней в их последовательном усложнении и взаимодействии.

Блок-схема моделей трех уровней представлена на рис. 1, а перечни внешних воздействий и включенных в модель процессов представлены в таблице 1. Остановимся на последовательном рассмотрении этих уровней.

## Уровни продуктивности

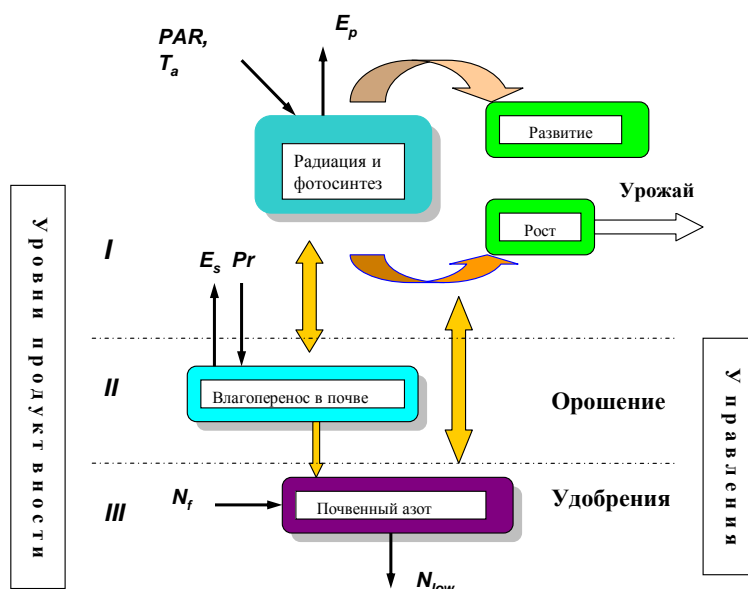


Рис. 1. Блок-схема моделей трех уровней продуктивности агроэкосистем.

I, II, III – уровни продуктивности,  $PAR, T_a$  – приходящая к посеvu ФАР и температура воздуха,  $E_p$  – транспирация,  $E_s$  физическое испарение,  $N_f$  – поступление азота из атмосферы,  $N_{low}$  – вымывание азота,  $P_r$  – осадки.

Таблица 1. Уровни продуктивности агроэкосистем

Уровни продуктивности	Процессы	Воздействия	Управление
I	Радиационный режим, фотосинтез, дыхание, рост, развитие	Приходящая к посеvu ФАР, температура и влажность воздуха	–
II	Динамика почвенной влаги, транспирация и испарение	Осадки	Режимы орошения
III	Динамика соединений азота в почве и в растениях		Минеральные и органические удобрения

**Потенциальная продуктивность (уровень I).** Этому уровню соответствует верхняя треть рис. 1. Поскольку на этом уровне влажность почвы является неизменной и равной НВ, а влияние азотного питания отсутствует, то модель имеет простейшую структуру и в модельное описание должны быть включены только три блока, а именно:

- блок радиационного режим посева;
- блок газообмена посева (фотосинтеза и дыхания);
- блок роста и развития.

Влияющими на эти процессы внешними факторами являются приходящая к посеву коротковолновая радиация (и ФАР как ее часть), а также температура воздуха. Модель этого уровня имеет в основном теоретическое значение. Управляющие воздействия отсутствуют. Блоки радиационного режима и газообмена работают точно так же как и в общей модели (Полуэктов и др., 2006) и могут быть полностью заимствованы из нее. Единственное отличие этого варианта от его аналога в общей модели заключается в том, что в силу отсутствия лимитирования по влаге устьичное сопротивление является постоянным и соответствует полностью открытому устьичному аппарату. Поэтому фотосинтез будет достигать максимально возможного уровня для данной культуры, сорта и метеорологических условий. Что же касается других блоков, то они также в основном повторяют алгоритм общей модели. Отличие здесь также сводится к тому, что влияние водного режима на скорость развития исключается. Выход модели этого уровня в целом дает возможность оценить:

- динамику формирования органов растения;
- сроки наступления фенологических фаз в условиях оптимального увлажнения;
- ход потенциальной эвапотранспирации.

**Лимитирование урожая уровнем доступной почвенной влаги (уровень II).** На этом уровне к модели добавляется еще один блок, а именно блок динамики влагопереноса в системе «почва – растительный покров – приземный воздух». На рис. 1 этому уровню соответствуют две верхних трети схемы. К внешним воздействиям добавляются влажность воздуха и осадки. Появляется также возможность управлять режимами ороше-

ния. Надо сказать, что модели 2-го уровня имеют не только теоретическое, а и большое практическое значение. В частности, они могут претендовать на описание продукционного процесса в системах точного земледелия. Действительно, технология точного земледелия предполагает управление азотным режимом, дифференцированное в пределах поля. А это и приводит к отсутствию лимитирования по азоту, т.е. означает переход посева на второй уровень продуктивности.

Структура модели второго уровня является наиболее типичной. Она описана во многих публикациях, в том числе, и в цитированной ранее монографии (Полуэктов и др., 2006). Алгоритм моделирования почвенной влаги сводится к численному решению уравнения Ричардса (Richards, 1931). Для расчета реальных значений транспирации и физического испарения используется модифицированный нами метод Пенмана – Монтейса (Penman, 1948; Monteith, 1981). Водный статус оказывает влияние на другие блоки, уже включенные в модель первого уровня. При отклонении водного статуса почвы от оптимального как в сторону засухи, так и в сторону переувлажнения корректируется устьичное сопротивление, что приводит к снижению интенсивности фотосинтеза (Полуэктов и др., 1997). Стресс по влаге влияет также на темп развития растений, замедляя его на межфазных периодах от сева до всходов и от цветения до полного созревания и ускоряя его в период от всходов до цветения. Как и в модели 1-го уровня на выходе модели этого уровня можно получить:

- динамику формирования органов растения;
- сроки наступления фенологических фаз в условиях реального увлажнения;
- ход реальных значений транспирации и физического испарения;
- динамику почвенной влаги, как по профилю почвы, так и по времени.

**Лимитирование по азотному питанию (Уровень III).** Азот, доступный для растений, является дополнительным фактором, лимитирующим продуктивность агроэкосистемы на этом уровне. Точнее говоря, уровень азотного питания может лимитировать урожай либо в течение всего периода вегетации, либо его части. В те периоды, когда со-

держание азота в почве является оптимальным для растения, оно переходит на второй, а быть может, и на первый уровень продуктивности. На рис. 1 этому случаю соответствуют все три части блок-схемы. К модели 2-го уровня, описанной ранее, здесь добавляются структурные части, описывающие динамику трансформации и миграции соединений азота в почве и взаимодействие почвенной и биологической частей модели. Новых дополнительных внешних воздействий на этом уровне не появляется, а в качестве добавочного управляющего воздействия появляется режим внесения органических и минеральных азотных удобрений.

В почвенную часть азотного блока включено описание следующих процессов:

- поступление азота из атмосферы (сухое выпадение и выпадение с осадками);
- минерализация растительных остатков и гумуса;
- иммобилизация, нитрификация и денитрификация;
- перенос нитратов по почвенному профилю;
- вымывание нитратов из расчетного слоя почвы;
- поглощение аммония и нитратов корнями растений.

Основной механизм влияния дефицита азота на продукционный процесс связан с перераспределением первичных ассимилятов между надземной и корневой частями системы. В моделях 1-го и 2-го уровней доля ассимилятов направляемая в корни фиксирована. Она определяется ростовыми функциями. В моделях же 3-го уровня она является переменной, определяющей уровень продуктивности в целом. Дефицит азота приводит к тому, что растение увеличивает долю ассимилятов, направляемых в корни. Это приводит к уменьшению биомассы надземных (фотосинтезирующих) органов, к снижению суммарного фотосинтеза посева и к потерям урожая.

Прежде всего, следует отметить, что единственной переменной азотного блока, оказывающей влияние на биологическую часть модели является суммарная скорость поглощения азота корневой системой. Она и определяет количество азота, поглощаемого на каждом временном шаге модели. С другой стороны, прирост углерода на этом же

шаге определяется интенсивностью фотосинтеза. В растения на каждом временном шаге модели поступают два потока – поток углерода сверху и азота снизу. (рис. 2). Именно соотношение этих потоков и управляет распределением первичных ассимилятов, между корнями (ROOT) и надземными органами (SHOOT), приближая соотношение C:N в растении к стехиометрической величине (Полуэктов, Топаж, 2005). На выходе модели фиксируются все переменные, соответствующие модели 2-го уровня, и, кроме того:

- временная динамика содержания аммония и нитратов в расчетном слое почвы;
- вынос нитратов за пределы расчетного слоя.

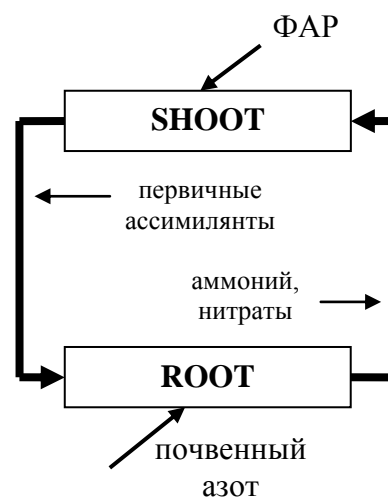


Рис. 2. Двухпоточная модель метаболизма растений. SHOOT – надземные органы посева; ROOT – корневая система.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модели всех трех уровней собраны в рамках единой управляющей программы – оболочки модели, которая предоставляет пользователю возможность организации компьютерного эксперимента с моделью, для чего он может в режиме диалога:

- выбрать один из трех типов модели (модель 1-го, 2-го или 3-го уровня);
- сформировать объект моделирования, для чего следует задать вид культуры, характеристики поля и погодные условия (реальные или смоделированные);
- выбрать тип задачи – расчет продукционного процесса в целом или оперативный прогноз с какой-либо даты;
- запустить модель на счет.

Вся необходимая для модели информация хранится в системе файлов, составляющей стационарную базу данных модели (Полужтов и др., 2006). Результаты моделирования отображаются в графическом виде и, кроме того, сохраняются в виде системы файлов. Информация, сохраняемая в файлах, является весьма подробной и может быть использована для детального анализа специфики производственного процесса.

Приведем некоторые результаты. На рис. 3 приведены результаты расчета урожая ячменя для трех уровней продуктивности и двенадцати лет вегетации. Используемые в модели данные о погодных условиях, характеристиках почв и агротехнике отвечают соответствующим данным для этой культуры, выращенной в семипольном севообороте Меньковской опытной станции. Нумерация лет начинается с 1983 года. Видно, что потенциальный урожай, а также урожаи других уровней не являются постоянными. Динамика производственного процесса ярового ячменя на трех уровнях продуктивности представлена на рис. 4. Как видно из рисунка, расхождение значений биомассы всех вегетативных органов в зависимости от уровня продуктивности начинается непосредственно после всходов. Однако динамика формирования колоса на уровнях II и III на значительном интервале времени мало отличаются друг от друга, хотя конечные значения биомассы колоса (а значит, и урожая) существенно отличаются друг от друга. Это, по-видимому, связано с тем, что расчет модели 3-го уровня выполнен при большой дозе азотных удобрений (N90). Напомним, что 2-й уровень продуктивности ассоциируется с технологией точного земледелия. Поэтому целесообразно сравнить расчетные и фактические показатели по урожайности для этих случаев.

В табл. 2 приведено сравнение фактических и расчетных величин урожая яровой пшеницы на Меньковской опытной станции за 2007 и 2009 годы для технологии точного земледелия и трех обычных технологий – без удобрений, хозяйственный (N45–N50) и высокоинтенсивный (N90–N100) уровни удобрений.

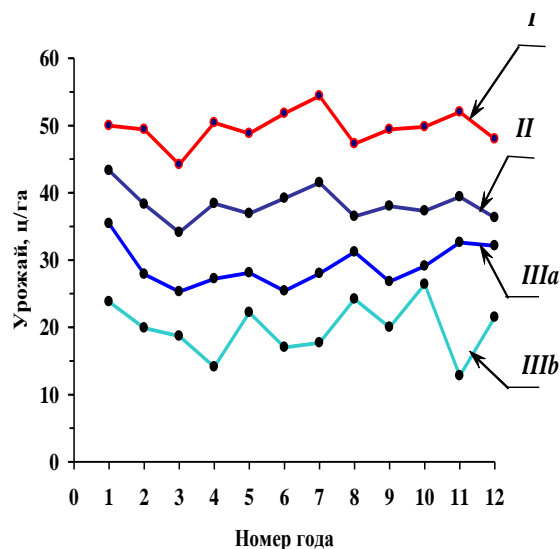


Рис. 3. Сравнение урожаев трех уровней продуктивности. (Меньковская опытная станция АФИ, ячмень).

Нумерация лет начинается с 1983 года.

I – потенциальная продуктивность,  
II – лимитирование почвенной влагой,

III – лимитирование влагой и азотом,  
a – N90 (внесено 90 кг N на гектар с азотными удобрениями), b – N45 (внесено 45 кг N на гектар с азотными удобрениями).

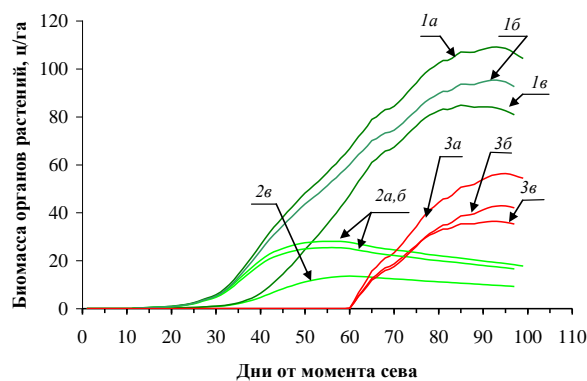


Рис. 4. Динамика биомассы органов растения на трех уровнях продуктивности (Меньковская опытная станция АФИ, ячмень, 2006 год).

Биомасса: 1 – надземная, 2 – листьев, 3 – колоса.  
a – уровень I (потенциальная продуктивность),  
b – уровень II (лимитирование почвенной влагой),  
v – уровень III (лимитирование почвенным азотом).

**Таблица 2.** Сравнение расчетных (Расчет) и фактических (Эксп.) уровней урожая яровой пшеницы

Год	Точное земледелие (II уровень). Урожай, ц/га		Урожай III уровня продуктивности (ц/га), Технологии					
	Расчет	Эксп.	Без удобрений		Хозяйственная		Высокоинтенсивная	
			Расчет	Эксп.	Расчет	Эксп.	Расчет	Эксп.
2007	54,3	51,0	42,5	30,7	45,7	40,7	50,7	47,0
2009	46,8	47,0	38,6	28,6	–	–	45,0	41,7

### ВЫВОДЫ

Предложенный вариант определения уровней продуктивности агроэкосистем обладает существенными преимуществами перед теми, которые используются в настоящее время. Он не требует задания такой мистической величины как «коэффициент использования ФАР», а, кроме того, дает более обоснованные оценки, чем расчет с помощью ГТК или бонитета почвы.

Сравнение модели 3-го уровня продуктивности с экспериментальными данными, полученными в семипольном севообороте Меньковской опытной станции АФИ, подтверждает удовлетворительную точность модельных расчетов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-05-00415.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондаренко Н. Ф., Жуковский Е. Е., Небольсин А. Н., Кашенко А. С., Усков И. Б. 1986. Высокие урожаи по программе. Л.: Лениздат.
- Жуковский Е. Е., Усков И. Б. 1985. Методология и принципы программирования урожая на современном этапе. Земледелие 12:15–22.
- Пеннинг де Фриз Ф. В. Т., Х. Х. Ван Лаар. 1986. Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур. Л.: Гидрометеиздат.
- Полуэктов Р. А., Кумаков В. А., Василенко Г. В. 1997. Моделирование транспирации посевов сельскохозяйственных растений. Физиология растений. 1:68–73.
- Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Терлеев В. В., Топаж А. Г. 2006. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Изд. СПбГУ, Санкт-Петербург.
- Полуэктов Р. А., Топаж А. Г. 2005. Расчет отношения root/shoot в моделях органогенеза высших растений // Физиология растений. 5:1–7.
- Monteith J. L. 1981. Evaporation and surface temperature. Quart. J. Roy. Met. Soc.. 101:1–27.
- Penman H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. A193:120–146.
- Richards L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous media. Physics.1:95–112.