

Лекция 21. Принципы построения двухпоточных моделей

1. Принципы построения двухпоточных моделей
 - 1.1 Динамика минеральных форм азота в почве
 - 1.2 Динамика азота и углерода в растении
2. Задачи прогноза и управления, решаемые с помощью прикладных моделей.

1. Принципы построения двухпоточных моделей

Многие динамические модели продуктивности агроэкосистем используют концепцию одного потока – притекающего к фотосинтезирующим органам углекислого газа и его превращения в растениях первоначально в углеводы, а затем распределения по органам растения и перехода в структурную биомассу. При построении таких моделей нужно учесть факторы, влияющие на фотосинтез и на распределение накопленных ассимилятов.

Двухпоточные модели связаны с учетом взаимодействия в растениях углерода и азота. Эти модели предназначены для описания продукционного процесса когда фактором, лимитирующим урожай, являются элементы минерального питания. Главным из таких факторов является азот – наиболее динамичный из тех, что связаны с уровнем и качеством урожая. Динамика миграций и трансформаций соединений азота в почве и в растениях весьма многообразна, поэтому на этом примере могут быть проиллюстрированы принципы построения двухпоточных моделей.

Моделирование динамики азота позволяет обосновывать решения по проведению азотных подкормок в оперативном режиме с учетом складывающейся в данном сезоне агрометеорологической обстановки. При этом могут быть учтены требования по охране окружающей среды от нитратных загрязнений, а также может быть поставлена задача управления качеством урожая. Известно, что хотя процентное содержание азота в растении невелико, его роль огромна. Дефицит азота приводит к перестройке всех функций растений, изменению их морфологических признаков и урожая. Важно учесть также избыток азота, что связано с применением неоправданных высоких доз удобрений или с погодными условиями, не позволяющими растению эффективно утилизировать имеющиеся фонды.

При построении двухпоточных моделей важно определить какие новые переменные следует включить в модель, от каких внешних факторов наиболее сильно зависят транспорт и превращения углерода и азота, каким образом можно описать взаимодействие углерод-азот в растении?

На уровне двухпоточной модели в нее должны быть включены, по крайней мере, четыре группы переменных: подвижные и запасные углеводы и подвижные и запасные соединения азота. В качестве подвижных углеводов выступают сахара, а в качестве запасных – крахмал. Подвижные соединения азота – аммоний и нитраты – можно, по-видимому, объединить. Запасной блок азота можно идентифицировать с содержанием нитратов в вакуолях. Кроме

того, разумеется, в модели должна быть представлена структурная биомасса.

Для моделирования «перетоков» между компартментами следует описать зависимости скорости корневого поглощения азота от влияющих на нее факторов, интенсивности транспортных процессов, обмена между подвижными и запасными блоками и синтеза структурной биомассы. Кроме того, в модель должны быть включены зависимости скоростей реутилизации углерода и азота, высвобождающихся в процессе распада структурной биомассы вегетативных органов. Наконец, главной задачей является формулировка принципа, на основе которого можно будет описать взаимодействие углерод-азот в растении. При этом важно учесть адаптивные реакции растений на условия внешней среды.

Для построения полной компартментальной схемы и представления почвенных превращений необходимо:

1) описать трансформации компонент системы внутри каждого из выделенных слоев почвы;

2) описать перетоки подвижных соединений между слоями.

Заметим, что не все присутствующие в почве субстанции подвижны. Например, гумус не переносится из слоя в слой. Слабо подвижен фосфор. С другой стороны, некоторые соединения, например хлориды, переносятся по почвенному профилю без изменений. Почва для них является косной пористой средой. Наоборот, соединения азота подвергаются многочисленным трансформациям внутри каждого слоя почвы, а некоторые из них легко мигрируют по почвенному профилю.

1.1 Динамика минеральных форм азота в почве

Азотсодержащие почвенные соединения подвержены микробиологическим трансформациям и водной миграции в большей степени, чем соединения всех других элементов, а значит, режим азотного питания существенно зависит от неуправляемых погодных факторов. Поэтому реальный урожай лимитируется чаще всего азотом. Более того, многочисленные попытки разработать статические, так называемые балансовые модели окончились безрезультатно, поскольку фигурирующие в них коэффициенты использования питательных веществ из почвы и удобрений не являются константами, а существенно зависят от температурного режима и условий увлажнения почвы, меняющихся в динамике. Все это говорит о важности включения блока трансформации азота в комплексную модель продукционного процесса.

При построении модели трансформации и миграций соединений азота в почве мы должны учитывать соотношения трех типов:

1) уравнения, определяющие скорость перетоков подвижных соединений между отдельными почвенными слоями («вертикальные» связи между компартментами);

2) уравнения баланса различных соединений в каждом почвенном слое («горизонтальные» связи между компартментами, геометрически соответствующие каждому слою почвы);

3) соотношения, определяющие интенсивность поступления тех или иных соединений в почву («приход» азота с осадками, удобрениями, семенами) и выноса азота из почвы (распад — корневые поглощения и потери).

Полная схема взаимодействий является чрезвычайно сложной и, кроме того, содержит многочисленные и трудно определяемые параметры. Поэтому ее следует предварительно разумно упростить, сохранив, однако, существенные детали. Одним из таких упрощений является исключение из рассмотрения нитритных форм азота, как промежуточных и слабо влияющих на общую картину. К другому упрощению относится выделение в органических остатках лишь двух фракций — быстро и медленно минерализующихся. К первым из них относятся фракции органического вещества, распад которых происходит в течение нескольких суток (аминокислоты, белки), ко вторым относятся те, полная минерализация которых происходит в течение десятков суток и даже месяцев (целлюлоза и гемицеллюлоза, лигнин).

Поскольку растения получают азот из растворенных в воде нитратов и аммония, в общую схему следует включить именно те процессы, которые в наибольшей степени влияют на концентрацию этих веществ. После этого можно будет «замкнуть» уравнения динамики, связав с переменными, входящими в почвенный блок, корневое поглощение.

Название азотсодержащих форм азота в почве:

1. Органический азот быстро минерализующихся фракций
2. Органический азот медленно минерализующихся фракций
3. Азот в гумусе
4. Органический азот в микробиальной ткани
5. Азот в растениях
6. Газообразный азот
7. Аммонийный азот в обменном комплексе
8. Фиксированный аммонийный азот
9. Аммонийный азот в нерастворившихся минеральных удобрениях
10. Нитратный азот в нерастворившихся минеральных удобрениях
11. Аммонийный азот в почвенном растворе
12. Нитратный азот в почвенном растворе

Название процессов трансформации азотсодержащих форм в почве:

1. Минерализация гумуса (v_k)
2. Аммонификация органических остатков (v_{am})
3. Растворение удобрений (v_{ams} , v_{ns})
4. Поглощение аммония и нитратов корнями (v_{amr} , v_{nr})
5. Потери, вызванные денитрификацией (v_l)
6. Переход аммония в обменную форму и обратно (v_{ch} , v_{dch})
7. Переход аммония в фиксированное состояние (v_f)
8. Нитрификация (v_{na})
9. Имобилизация аммония и нитратов (v_{amas} , v_{nmas})
10. Перетоки нитратов между почвенными слоями (v_{nw})

Исходя из условий баланса можно записать два соотношения, определяющие суммарные скорости накопления (или расходования) нитратов NA (v_n) и аммония AM (v_a) в почвенном растворе:

$$v_n = v_{na} + v_{ns} - v_{nr} - v_l - v_{nmas},$$

$$v_a = v_h + v_{am} + v_{ams} + v_{dch} - v_{na} - v_{ch} - v_{amas} - v_{amr}$$

Далее вспомним особенности превращений азота в почве.

Аммонификация. Скорость аммонификации включает в себя две составляющих, каждая из которых соответствует разложению двух форм органики. Если исключить чрезвычайно медленный процесс утилизации лигнина, то к медленно разлагающейся фракции можно отнести целлюлозу и гемицеллюлозу, а к быстро разлагающейся — аминокислоты и белки.

$$v_{am} = k_q(N_q^0 - AM_q) + k_s(N_s^0 - AM_s),$$

Где k_q , k_s — константы скоростей реакций,

AM_q , AM_s — текущее количество аммония, высвобождающегося за счет процесса аммонификации,

N_q^0 , N_s^0 — содержание азота в каждой из фракций в начальный момент времени.

Константы реакций определяются биологической активностью почвы и зависят от pH, температуры и влажности почвы, обеспеченности процесса кислородом.

Иммобилизация. В процессе минерализации органических соединений образуется ферментативно-сбраживаемый субстрат, потребляемый микроорганизмами и идущий на построение их биомассы. В качестве источника энергии при этом используется органический углерод, высвобождающийся в процессе разложения органики. В условиях, близких к оптимальным, можно считать, что азот, потребляемый в виде нитратов и аммония почвенной микрофлорой, составляет некоторый процент от того, который образуется в цепи реакций нитрификации. Это означает, что не весь азот переходит в доступную форму. Его определенная часть «ответвляется» и аккумулируется в микробиальной ткани.

$$v_{amas} = \beta_1 v_{am} \quad v_{nmas} = \beta_{12} v_{na}$$

Разумеется, в более полные модели необходимо включать дополнительные уравнения, учитывающие динамику популяций почвенных микроорганизмов.

Минерализация гумуса. Если учесть, что в течение одного сезона вегетации содержание гумуса в почве практически не изменяется, то для описания процесса его минерализации можно воспользоваться уравнением:

$$v_h = k_h N_h$$

где N_h — содержание гумусного азота в почве.

При этом под термином «гумусный азот» понимается сумма как собственно органического азота гумуса, так и азота отмирающей микробиальной ткани, которая подвергается непосредственной минерализации.

Нитрификация. При малых концентрациях аммония в почвенном растворе AM скорость нитрификации линейно растет с ростом этой концентрации, а при больших концентрациях стремится к постоянной величине.

$$N_{na} = v_{na}^{max} \cdot AM / (1 + k_{na} \cdot AM)$$

Максимальная скорость нитрификации так же, как и скорость аммонификации, зависит от параметров состояния почв, однако, поскольку бактерии-нитрификаторы являются автотрофами, их активность определяется также содержанием кислорода в почвенном воздухе и, следовательно, в растворе.

Денитрификация. Денитрификация происходит в анаэробных условиях при резком дефиците кислорода, т. е. при условии $C_{O_2} < C_{кр}$,

где $C_{кр} \approx 0,00642 \text{ см}^3 \text{ O}_2/\text{мл}$ раствора.

Спилиометрические расчеты показывают, что на окисление 1,0174 г органического углерода требуется 1 г азота, входящего в состав нитратов. Таким образом, скорость денитрификации может лимитироваться одним из двух субстратов. При наличии избыточного количества органического углерода она пропорциональна текущему количеству нитратов

$$v_l(1) = k_d \cdot F_d \cdot NA$$

где k_d — константа реакции,

F_d — множитель, зависящий от внешних условий (в частности, $F_d=1$ при концентрации кислорода намного меньше критической). В случае избытка нитратов скорость денитрификации лимитируется интенсивностью высвобождения углерода в процессе аммонификации:

$$v_l(2) = k_q(C_q^0 - C_q) + k_s(C_s^0 - C_s)$$

где C_q^0 и C_s^0 — начальное содержание углерода в двух фракциях органического вещества, а C_q и C_s — соответственно их текущие величины, образующиеся в процессе разложения.

На скорость денитрификации оказывает влияние также температура почвы и ее кислотность.

1.2 Динамика азота и углерода в растении

Описание динамики взаимодействия углерода и азота в растении замыкает модель азотного цикла в агроэкосистеме. Включение лимитирования по азоту позволяет принципиально по-иному подойти к описанию физиологических блоков модели, учесть новые адаптивные

реакции растений на условия их выращивания на той основе, которая названа нами выше «концепцией двух потоков».

Растения в своем жизненном цикле проходят три основных стадии — стадии прорастания семян (гетеротрофное развитие), стадии вегетативного и генеративного роста. Естественно, что роль и кинетика превращений азота и его взаимодействия с углеродом на всех трех стадиях различны. Поэтому следует остановиться на описании каждой из них в отдельности.

Прорастание семян. Прорастание семян после посева начинается, как известно, при определенных условиях увлажнения и в определенном диапазоне температур. Семена озимой пшеницы, например, прорастают и при температуре 2°C, однако этот процесс происходит чрезвычайно медленно. С повышением температуры скорость прорастания увеличивается. По данным А. И. Коровина, при температуре 10 - 18 °C и влажности около 0,6 НВ семена пшеницы прорастают на третий день, а при 3 - 6°C — на пятнадцатый. При температуре выше 24 °C процесс прорастания также замедляется. Избыток влаги так же, как и ее недостаток, отрицательно сказывается на процессе прорастания.

Собственно процесс прорастания можно разделить на три периода:

1. Набухание семян, представляющее собой чисто физический процесс. Если семена высушить после набухания, их сухая масса становится равной первоначальной.

2. Период чисто гетеротрофного питания проростков. Начинается этот период с того момента, когда поглощенная вода включается в метаболизм семени. При этом происходит гидролиз углеводов и белков, локализованных в запасном органе, их транспортировка в проросток и образование структурной биомассы проростка.

3. Третий период отличается от второго тем, что в метаболизм включается экзогенный азот, поступающий из почвы, а затем и углерод воздуха.

Рассмотрим некоторые детали. Движущей силой, определяющей поглощение воды семенем, является разность водных потенциалов почвы и семени. Поэтому в почвах, различных по своему механическому составу, набухание семян при одной и той же влажности происходит по-разному. Поток влаги, поступающий внутрь семени (v_g), описывается уравнением

$$v_g = S_g Q_g (p - P_g(t))$$

где p и $P_g(t)$ - водный потенциал соответственно почвы и семени,

Q_g - проводимость оболочки семени,

S_g - поглощающая поверхность.

С ростом влажности семени абсолютная величина его водного потенциала падает и при $p = P_g(t)$ наступает равновесие. Если теперь перенести семя в более сухую среду, характеризующуюся меньшим значением p (напомним, что величины p и P_g отрицательны), влага будет отдаваться семенем в окружающую среду. Процесс «обратимого» набухания

в условиях достаточного увлажнения протекает в течение 8-14 ч.

Первой реакцией семян на проникновение воды через оболочку является активация обмена веществ. Практически все органы и ткани семени содержат, помимо белков, жиров и полисахаридов низкомолекулярные соединения – сахара и аминокислоты. Эти соединения и активируются в первую очередь. Аминокислоты утилизируются главным образом в процесс дыхания для выработки АТФ, участвующей затем в различных процессах метаболизма. Через 10-20 ч после набухания наступает лаг-период. Последующее усиление метаболизма совпадает с началом гидролиза белков, полисахаридов и жиров и к 36—48 ч усиливается передвижение веществ из запасующих тканей в зародыш.

В процессе прорастания семени по мере истощения его запасных соединений ослабляется утилизация гетеротрофных источников углерода и азота. При этом усиливается поглощение азота из почвы сформировавшимися к этому времени зародышевыми корнями и автотрофное усвоение растением углекислоты за счет фотосинтеза. В естественных условиях прорастания семян растения практически одновременно потребляют азот почвы и азот запасующих тканей семени. Отметим, что эта закономерность отмечается у растений, чьи семена содержат относительно мало азота – ячменя, кукурузы, пшеницы. В противоположность этому горох, например, может развиваться и при отсутствии азота в питательной среде в первые недели роста.

Стадия вегетативного роста. Фаза всходов заканчивается через 4—8 дней после появления первого настоящего листа. В этот момент, у пшеницы, например, начинает формироваться узел кущения главного побега. После формирования всходов растения уже в полной мере осуществляют свои ростовые функции путем использования двух потоков – поступления минеральных веществ (азота) снизу и углерода сверху. Скорость поглощения азота корнями (v_{nr}) можно выразить следующим уравнением:

$$v_{nr} = \frac{v_m \cdot NA \cdot C_{mob}^r}{v_m \cdot (k_1 \cdot C_{mob}^r + k_2 \cdot NA) + NA \cdot C_{mob}^r}$$

Где v_m – максимальная скорость поглощения нитратов, определяемая анатомическим строением корня,

NA – содержание нитратов в почве,

C_{mob}^r – содержание мобильных соединений углерода в корнях

k_1, k_2 – параметры.

Уже на этом этапе происходит взаимодействие углерода и азота в растении.

Оказалось, что последовательно реализовать в модели «концепцию двух потоков», невозможно, если наряду со структурными и лабильными пулами не ввести в рассмотрение пулы запасных веществ.

В реальной жизни растения, по-видимому, не существуют без запасов, что позволяет им пережить трудные времена, связанные с временным

дефицитом тех или иных субстанций. Модель должна естественным образом отразить этот факт, иначе она не может претендовать на адекватность моделируемой системе. Причиной, вызывающей необходимость включения в модель запасных пулов, является динамичность и изменчивость внешних условий, не позволяющих растению в каждый момент времени идеально использовать оба потока для согласованного роста и развития различных органов. Всегда либо углерод, либо азот окажутся в относительном избытке. И этот избыток, естественно, должен быть либо выведен из организма растения, либо отправлен в резерв.

Рассмотрим первоначально случай дефицита по азоту на вегетативной стадии роста. При малом дефиците может возникнуть ситуация, когда азота еще достаточно, чтобы выдержать оптимальное отношение $N : C$ для корней и стебля. Тогда их прирост за шаг модели не уменьшается, а весь дефицит азота сказывается на уменьшении потока N в листьях. Относительно избыточный органический углерод отправляется в запас. Дальнейшее снижение уровня азотного питания приводит к тому, что начинается угнетение роста стебля. Дальнейшее снижение уровня азотного питания приводит к тому, что весь подвижный азот листьев, получаемый в процессе распада белков, направляется в корни. Растение в конце концов «съедает себя» и погибает.

Рассмотрим обратную ситуацию, а именно случай относительного избытка азота. В этих условиях формирование различных органов растения происходит в соответствии с ростовыми функциями, а избыток азота направляется в резерв. Если емкость резервного пула заполнена, избыток азота выводится из растения в почву.

Выше мы рассмотрели два крайних случая в «чистом» виде. На самом деле в ходе вегетации ситуация меняется. В ранне-весенний период азот, благодаря низкой скорости минерализации почвенной органики, может оказаться в минимуме. Затем после укоса трав в минимуме может оказаться углерод. К концу вегетации, если не проводится подкормок, всегда в качестве лимитирующего фактора выступает уровень азотного питания. Таким образом, в модели балансы между мобильными, резервными и структурными пулами должны рассчитываться на каждом временном шаге модели. Фактически в растениях резервные пулы всегда создаются, поскольку точно выдержать стехиометрическое соотношение в каждые сутки невозможно. Кроме того, поступление ассимилянтов и минеральных веществ в резервный пул происходит значительно легче, чем их извлечение. На добывание C и N из резерва затрачивается энергия, т. е. должны расходоваться те же мобильные углеводы.

Стадия генеративного роста. В стадии вегетативного роста основными «акцепторами» C и N являются корни. В фазе стеблевания к ним добавляются стебли. Именно эти органы «диктуют» растению способ расходования поступающих веществ на построение тех или иных органов. В стадии генеративного роста эта роль переходит к колосу. При этом на стадии вегетативного роста производится закладка будущего урожая

(потенциального урожая данного года), а условия вегетации стадии генеративного роста определяют, реализуется ли этот потенциальный урожай полностью или частично.

В модели этот процесс описывается следующим образом. Условия, складывающиеся на вегетативной стадии, приводят к формированию не только биомассы различных вегетативных органов (листьев, стеблей, корней), но и «емкости бункера» потенциального урожая. На стадии генеративного роста эта емкость наполняется структурной биомассой. При этом, разумеется, урожай не может превысить той величины, которая уже определена на вегетативной стадии как «емкость бункера урожая». Физиологически с понятием «емкости» можно отождествить число растений на 1 м² поля, число продуктивных стеблей одного растения, число колосков в колосе, число цветков в колоске.

Наполнение бункера связано с фертильностью и стерильностью цветков, а также с выполненностью колоса. При этом, если на вегетативной стадии роста реутилизация углеводов и белков может выступать лишь как эпизод, связанный с резкой нехваткой органического углерода или азота, то на стадии генеративного роста это превращается в правило. Конкуренция здесь происходит лишь в зависимости от энергетических затрат — при избытке азота в почве он легко доступен, а при его нехватке естественно проще использовать азот из резерва или мобильного пула аминокислот, полученных в результате распада белков. Что же касается углерода, то он в большой степени потребляется колосом за счет реутилизации в связи с естественным пожелтением и отмиранием листьев.

2. Задачи прогноза и управления, решаемые с помощью прикладных моделей

Задача анализа. Эта задача возникает тогда, когда сезон вегетации закончен и погода известна. Тем не менее, всегда остается сомнение в том, все ли сделано для получения желаемого урожая. Поскольку величина урожая в модели формируется исходя из свойств почвы, растения и погоды, можно, производя расчет, сравнить его результат с фактическим урожаем. Подробный анализ может выявить те места, в которых были допущены ошибки (поздние сроки сева, неоптимальные дозы удобрений и норм поливов и т. д.). Во всяком случае, модель здесь даст идеальную картину, к которой надо стремиться. Сравнивая с ней реальность, можно, по крайней мере, оценить уровень своей квалификации и умение принимать правильные решения.

Тренинг и обучение. Эта задача является, по-существу, обобщением предыдущей. Действительно, любая модель сопровождается банком многолетних погодных данных и банком почвенных характеристик. Проигрывая модель на разных почвах в различных погодных условиях, можно существенно повысить уровень своей интуиции. Если в банке погоды хранятся реальные метеорологические условия за последние 20-30 лет, то очевидно, что при моделировании практически встретятся все

ситуации, которые можно ожидать в ближайшем будущем. Работая с моделью в ускоренном времени, можно проанализировать большой спектр сочетаний внешних условий и агротехнологий. Тем самым можно уже получить вполне определенные представления о том, что такое хорошо и что такое плохо в тех или иных условиях, которые могут встретиться.

Оценка агрометеорологической обстановки и текущего состояния посевов. Помимо общего анализа, модель следует использовать для оценки текущей ситуации, складывающейся в данном сезоне вегетации. Смысл этой задачи заключается в том, что полученная в результате ее решения информация дополняет те сведения о состоянии посевов, которые можно получить визуально. Хороший агроном периодически осматривает посевы. Но многое ли он может увидеть? Хотя это и зависит от его опыта и квалификации, тем не менее, многое из того, что определяет судьбу посева, остается недоступным при таких осмотрах. Использование модели способствует получению более детальных представлений о том, что происходит «внутри». Действительно, поскольку все переменные модели формируются на основе учета погодных данных, проведение соответствующих расчетов позволяет оценить в разрезе сельскохозяйственных полей и культур почвенные влагозапасы, содержание питательных элементов в почве и в растениях, интенсивность накопления биомассы различными органами формирование корневой системы и т. д. Модель здесь заменяет некоторый гипотетический «измерительный прибор» или точнее «измерительную систему». С ее помощью можно рассчитывать интересные нас параметры, вместо того, чтобы измерять их.

Районирование новых сортов. Вновь выведенный сорт имеет неопределенный ареал своего распространения. Ясно, что если сорт оказался более продуктивным в том месте, где он выводится, то его следует рекомендовать производству. Но где расположена граница районирования данного сорта? Это можно выяснить, проигрывая модель для тех погодных условий и тех почв, которые характерны для того или иного места выращивания. Отодвигая границы моделирования от места выведения сорта, например, в четырех направлениях (север, юг, восток и запад), можно найти точки, где данный сорт способен обеспечить те характеристики, которыми его наделил селекционер.

Задача динамического прогноза урожая. Эта задача должна решаться в оперативном режиме. Абсолютный прогноз нам известен в том смысле, что известны значения минимально возможного и максимального урожая (статистические данные за последние 10—15 лет). Вопрос заключается в сужении этой «вилки».

Будем осуществлять это последовательно. На первом шаге можно принять во внимание такие факторы, как весенние влагозапасы и доступные формы азота в почве, даты всходов, густоту посева. Далее можно обращаться к решению задачи в моменты наступления следующих фенофаз. При этом на каждом последующем шаге величина допуска уменьшается, а при получении реального урожая она «стягивается в точку».

Задача управления. Будем рассматривать ее на примере назначения норм и сроков полива. Традиционно эта задача решалась двумя способами: либо путем назначения нормативных показателей (программное управление), либо на основе коррекции этих показателей с учетом складывающихся в сезоне метеорологических условий (управление по возмущению).

Появление моделей создает принципиально иную основу для ее решения. При этом появляется возможность создания систем управления с обратной связью. Однако в орошаемом земледелии реализация подобного принципа имеет свою специфику. Если в технических системах для введения обратной связи используются измерения выхода объекта управления, то здесь в качестве «измерителя» выступает динамическая модель. Именно проигрывая на модели возможные ситуации и анализируя их последствия, мы должны выбирать ту стратегию управления, которая, по нашему мнению, приведет к успеху.

Другое отличие связано с односторонним характером управления. Действительно мы можем лишь увеличивать влагозапас почвы за счет полива и не в состоянии изымать избыток влаги из почвы, если не принимать во внимание достаточно редкие встречающиеся системы двойного регулирования. Назначая любую норму полива, мы должны были бы знать будущие осадки, что невозможно. Поэтому здесь возникает специальная задача достижимости цели управления. А ее решение должно быть основано на принципе «непопадания в необратимую ситуацию». Управлять надо так, чтобы не лишиться себя возможности коррекции поведения объекта управления (агроэкосистемы) в будущем.

Поэтому, учитывая неопределенность в будущих осадках, нормы полива должны быть занижены по сравнению с оптимальными. К сожалению, в реальной жизни мы поступаем как раз прямо противоположно.

Литература:

1. Измайлов, С.Ф. Азотный обмен в растениях / С. Ф. Измайлов. М.: Наука, 1986. – 320 с.
2. Полуэктов, Р.А. Имитационная модель продуктивности агроэкосистемы/ Р. А. Полуэктов. Tag. Ber. Akad. Landwirtsch/ - Wiss. – Berlin, 1981. p. 19-27.
3. Полуэктов, Р.А. Динамические модели агроэкосистемы: монография/ Р. А. Полуэктов. Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 311с.