

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАК СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ ТЕХНОЛОГИИ
УПРАВЛЕНИЯ МЕЛИОРАТИВНЫМ РЕЖИМОМ ПОЧВ****А.Н. Николаенко**

ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, Москва, Россия

Формирование мелиоративных режимов орошаемых почв есть результат взаимодействия оросительной воды с почвой. Таким путем формируются водный, воздушный, солевой, пищевой, микроэлементный и другие режимы почв. Из всего многообразия режимов можно выделить основные, которые взаимосвязаны и влияют на формирование других. Это водный, солевой и пищевой режимы почв. Действительно, солевой режим определяет структурные характеристики почвы, ее агрегатный состав и таким образом влияет на формирование водного и воздушного режимов почв. Кроме того, совместно с питательным и микроэлементным составляющими определяет условия произрастания растений и формирование урожая сельскохозяйственных культур. Формирование этих составляющих определяется процессом взаимодействия оросительной воды с твердой и сорбированной фазами орошаемых почв, и конечный результат зависит как от свойств воды, так и почвы. Изменяя компоненты воды или почвы, можно изменять состав поровых растворов и структуру почв, и в конечном счете влиять на условия роста и развития растений. Исходя из технологической, экономической и экологической целесообразности наиболее предпочтительно менять химический состав оросительной воды, ее солевое (катионное), питательное и микроэлементное содержание. При этом направленность и интервалы изменения ингредиентного состава можно корректировать прогнозными расчетами с использованием адаптированных математических моделей. Применяемые в практике модели условно можно разделить на три класса: аналоговые, статистические и детерминированные.

Аналоговые модели основаны на использовании подобия изучаемого процесса другому, имеющему иную физическую природу, параметры которого достаточно просто измерить. Однако аналоговое моделирование имеет ограниченные пределы применения и, вероятно, непригодно для точного количественного описания сложных природных процессов.

Статистические модели используются в случае, когда не определена аналитическая связь между исследуемым процессом и определяющими их факторами. Эта связь имеет случайный, вероятностный характер и устанавливается на основе имеющихся экспериментальных выборок с использованием соответствующим образом подобранного метода их статистической обработки. Прогноз, выполненный на основе статистических моделей, является обоснованным лишь в том случае, когда база экспериментальных данных содержит достаточный, представительный объем по всем факторам, а область их вариации соответствует области прогноза.

Детерминированные математические модели процессов представляют собой системы алгебраических и дифференциальных уравнений с совокупностью начальных и граничных условий, предполагающие возможность их решения аналитическими или численными методами. Такие модели предназначены для количественного описания процессов, происходящих в координатно-временном

пространстве и, по нашему мнению, наиболее пригодны для прогнозирования процессов формирования химических компонентов поровых растворов.

При этом за основу принималось уравнение конвективной диффузии (или его модификации) вида:

$$\frac{\partial(WC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - V \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (5)$$

где x – пространственная и t – временная координата; W – объемная влажность почвы; C – концентрация соли; V – скорость фильтрации; D – коэффициент конвективной диффузии.

Существенным недостатком данного подхода является отсутствие дифференциации вида солей и учета взаимодействия различных фаз почвы в формировании солевого режима почв. Например, неразличимость солей натрия и кальция делает невозможным использованием данного подхода к описанию процессов в солонцовых почвах, поскольку эти соли оказывают противоположное воздействие на формирование структуры почв.

Для более полного описания солевого и пищевого режимов почв автором предложены детерминированные математические модели, которые включают в себя систему уравнений массопереноса основных компонентов ионно-солевого комплекса почв – ионы натрия, кальция, магния, аммония, хлора, сульфат-ионов, и гидрокарбонат-ионов, нитратов и нитритов с учетом их химического, физико-химического и межфазного взаимодействия [3]. Тогда основное уравнение (5) трансформируется в систему уравнений, описывающую массоперенос многокомпонентного ансамбля ионно-солевого комплекса почв с учетом химических и межфазных взаимодействий, отражаемых в функциях источника – стока:

$$\frac{\partial WC_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - \frac{\partial VC_i}{\partial x} + Q_{T_i} + Q_{S_{ij}} + Q_{K_i} \quad (6)$$

где i – тип ионов солевого комплекса почв; $Q_{S_{ij}}$ – функции источников – стоков ионов, связанные с ионообменным взаимодействием между поровым раствором (ПР) и почвенным поглощающим комплексом (ППК), Q_{K_i} – функции поглощения и выделения ионных форм корневой системой растений; Q_{T_i} – функции источников – стоков, соответствующие растворению – кристаллизации солей твердой фазы почв, различных видов удобрений, минерализации органического вещества почв. Функции источников – стоков Q_T , Q_S , Q_K при конкретизации модели должны быть записаны в явном виде. Кроме того, система уравнений (2.6) должна быть дополнена уравнениями связи концентрацией ионов в различных фазах почвы и краевыми условиями.

За основу моделей солевого-пищевого режимов нами предлагается уравнение конвективно-диффузионного переноса с функциями источников-стоков, определяющими межфазное взаимодействие химических компонентов ионно-солевого комплекса почв. При этом компоненты комплекса могут быть расширены с добавлением ионов питательного ряда и микроэлементов. Учитывая практическую значимость для растений и степень воздействия на окружающую среду, животный мир и человека, состав комплекса может быть ограничен основными ионами натрия, кальция, магния, аммония, хлорида, сульфата, гидрокарбоната, нитрат-ионов.

Для формализации системы уравнений (6) и определения доминирующих процессов, изменяющих концентрации химических агентов в почвогрунтах, необходимо знать распределение солей по фазам почвы. Известно, что почва состоит из жидкой (ПР), твердой (ТФ) и сорбированной (ППК) фаз. Жидкая фаза – поровый раствор (благодаря своим физическим свойствам) является наиболее подвижной и изменчивой по химическому составу частью. Поэтому уравнения конвективной диффузии типа (6) записываются относительно концентрации химических компонент в почвенном растворе. Сорбированная и твердая фазы почв создают скелет пористой структуры и также являются источником ионов и солей.

Соотношение равновесного распределения солей и ионов по фазам почв зависит от их типа. Однако среднестатистическое распределение, проведенное для гипотетической засоленной почвы дает следующее соотношение: почвенный раствор – 10, твердая фаза – 50, ППК – 40%. Из этого соотношения следует, что именно твердая фаза и почвенный поглощающий комплекс являются основными «поставщиками» ионов и солей в поровый раствор посредством обменных межфазных процессов – растворением-кристаллизацией и ионообменной сорбцией; эти процессы должны учитываться функциями источников-стоков Q_{T_i} и $Q_{S_{ij}}$ в уравнении (6).

Для математической формализации этих функций необходимо выяснить, с какой скоростью протекают соответствующие им процессы, и в зависимости от этого применять уравнения равновесия или уравнения кинетики.

Процессы растворения-кристаллизации, происходящие с конечной скоростью, контролируются диффузионным механизмом и для почв могут быть описаны уравнением вида:

$$\xi \frac{dN}{dt} = \delta \left(\frac{N}{N_0} \right)^\alpha (C - C_H), \quad (7)$$

где N – содержание соли твердой фазы почвы, мг.экв./100г.; t – время, сут.; N_0 – содержание соли в начальный момент времени, мг.экв./100г.; C – содержание этой соли в поровом растворе, мг.экв./л; C_H – растворимость, мг.экв./л; ξ – коэффициент пересчета содержания соли в твердой фазе почвы в концентрацию соли в растворе, α – число, определяемое дисперсностью соли твердой фазы и ее удельной кристаллической поверхностью.

При количественном определении концентраций ионов в почвенном растворе и почвенном поглощающем комплексе при их взаимодействии многие исследователи (Vanselow, 1932; Гапон, 1934, Bolt, 1955; Vabcock, 1963) допускают, что в каждый момент времени ионы в растворе и адсорбированные ионы находятся в равновесии. При этом состояние равновесия катионов может быть описано изотермами ионообменной сорбции, соответствующих закону действующих масс для пары катионов:

$$\frac{N_i^{z_i}}{N_j^{z_j}} = K_{ij} \frac{a_i^{z_i}}{a_j^{z_j}} \quad i, j = 1, \dots, n \quad (8)$$

где N – содержание катионов в ППК, мг.экв./100г; a – активность катиона в ПР; z – заряд катиона; K_{ij} – константа ионообменного равновесия катионной пары. Из всех возможных уравнений типа (8) ($n-1$) уравнений будут независимыми, а остальные – их комбинации. Для замыкания системы (6) предполагается воспользоваться тем, что емкость поглощения ППК является постоянной, то есть

$$\sum_{i=1}^n N_i = const \quad (9)$$

Процессы катионного обмена в почвах происходят в естественных условиях с конечной скоростью. На это было обращено внимание Н.И. Горбунова [2], отметившего, что большие скорости катионного обмена характерны лишь для почвенных суспензий при соотношении вода : почва порядка 10 : 1.

Уравнение сорбции, предполагая внешне-диффузионную кинетику обмена, можно записать в виде:

$$\xi \frac{dN_i}{dt} = \beta_i (C_i - C_{ip}), \quad (10)$$

где C_{ip} – концентрации равновесия ионного обмена, определяемые из уравнений (8, 9); β_i – кинетический коэффициент. Для получения решения система уравнений (8 – 10) должна быть дополнена начальными и граничными условиями для концентраций ионов и солей в жидкой, твердой и сорбированной фазах

Кроме источников-стоков, связанных с межфазными процессами, необходимо учитывать поглощение элементов питания, например, азота (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) корневой системой растений, которое может быть учтено уравнением (6) путем введения функции, описываемой уравнением Михаэлиса-Ментен [1].

Таким образом, количественная интерпретация солевого и пищевого режима почв должна базироваться на использовании основного уравнения конвективно-диффузионного переноса химических компонентов с учетом основных функций источников-стоков ионов и солей в почве, обусловленных межфазными взаимодействиями. При этом конкретный химический состав оросительной воды учитывается в верхнем граничном условии ($x=0$) и таким образом влияет на результирующую концентрацию ПР, то есть на формирование солевого, пищевого, микроэлементного режима орошаемых почв.

Литература

1. Артюшин А.М., Державин Л.М. Краткий справочник по удобрениям. М., Агропромиздат, 1984.
2. Горбунов Н.И. Минералогия и физическая химия почв. М., Наука, 1987.
3. Николаенко А.Н. Математическая модель миграции и трансформации азотных соединений в системе почва-раствор-растение. В сб.: Современные проблемы мелиорации и пути их решения. М., ВНИИГШМ, 1999, т.2.
4. Nikolaenko A.N. Mathematical Model of Multy-Ion_Salt Migrashion in Soils and Pore Solutions. Abstracts jornal of Conference V.M. Goldschmidt. Heidelberg, Germany, 1966.
166. Barber S.A., Walker J.M., Vasly E.M. Principles of Ion Movement Throught the Soil to the Plant Root. Proc. Intern. Soil. Conf., New Zealand, 1962.