

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОЛЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В
ПОЧВОГРУНТАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ
ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ СОЛЕНАКОПЛЕНИЯ**

Ботолаева Г.К., Туганбаев У.М., Урманбетов Р.Ж.

Кыргызский национальный аграрный университет им. К.И.Скрябина

В настоящее время для сельского хозяйства большое значение имеет теоретическое и практическое изучение соленакопления и деградации почвогрунтов. К сожалению в нашей Республике очень мало научно – исследовательских работ, посвященных миграции различных концентраций солей с разработкой их математических моделей и методов решений с применением современного аппарата математики. Сложность процессов и систем, с которыми имеет дело земледелие, гораздо более выше, чем в промышленном комплексе. Чудновский А.Ф. писал «... ни в одном промышленном процессе мы не встречаемся со столь причудливым, случайным наложением огромного числа факторов, которые действуют в полевых условиях при формировании урожаев сельскохозяйственных культур». С увеличением сложности процессов неизмеримо больше возрастает трудность управления ими в нужном для сельского хозяйства направлении. Вот почему развитие сельского хозяйства сильно отстает от промышленности. Вся трудность исследования заключается в том, что сельскохозяйственные поля занимают большие площади, земледелие имеет дело с огромной массой вещества, рассеянной энергией, процесс почвообразования обладает определенной косностью, определенной консервативностью по

отношению к управляющему воздействию со стороны человека. Отставание сельского хозяйства объясняется еще и тем, что оно опирается на биологические, геолого – географические науки, которые в основном носили описательный характер т.е. выдавали в основном качественную информацию о рассматриваемом процессе.

В настоящее время, перспективно применение автоматики в орошаемом земледелии. Регулируя содержание влаги в почве, можно одновременно воздействовать на тепловой, воздушный и солевой режимы почв. Для избежания отрицательных последствий орошения – вторичного засоления, переувлажнения почв, заболачивания необходимо пользоваться некоторыми мелиоративными приемами [1]. К ним относится искусственный дренаж, промывки почв, специальная агротехника. Известно, что борьба с засолением – это старая проблема ирригации, которая по настоящее время еще не решена до конца. Его успешное решение во многом зависит от наличия количественного описания процессов передвижения солей в почве и воды на орошаемых массивах [2]. Только такое описание дает возможность уверенного прогнозирования, расчета количества солевого раствора в почвогрунтах и оптимального управления им.

Вопрос о происхождении легкорастворимых солей и засоленных почв решен достаточно подробно и убедительно [1]. Качественная картина засоления почв такова: осадки, которые выпадают в горных областях, просачиваются в почвы и грунты, формируют поток грунтовых и подземных вод, которые двигаясь вниз под действием силы тяжести, обогащаются различными солями – продуктами выветривания горных пород. При выходе на равнину поток грунтовых вод приближается к поверхности почвы, а часть из них рассеивается в атмосферу за счет транспирации и испарения. По мере испарения дистиллированной воды, концентрация солей в капиллярной кайме возрастает. В результате повышения концентрации солей в устьях

капилляров возникает градиент концентрации, который вызывает обратный диффузионный ток солей в грунтовые воды, которые обогащаются солями и по мере движения вниз по потоку увеличивают свою минерализацию. Соли с низкой миграционной способностью выпадают в осадок на более высоких отметках рельефа. Более подвижные соли двигаются дальше вниз и остаются в почвенных грунтах или достигают базиса подземного стока, в котором они значительно теряют скорость [2]. Расходятся эти воды в основном на испарение, что ведет к накоплению солей в почвогрунтах и грунтовых водах. Для природных условий, на которых происходит засоление почв, наиболее характерна низкая естественная дренированность и повышенное испарение. Орошение почв с такими условиями, ускоряет развитие засоления. Площадь засоленных и потенциально засоленных земель велика. В связи с тем, что территории с хорошей естественной дренированностью и благоприятным рельефом уже освоены под ирригацию, то дальнейший рост поливных земель будет происходить на участках с потенциальным засолением почв.

Вот почему борьба с засолением имеет большую актуальность, остроту и по сей день. На процесс засоления влияет множество факторов окружающей среды [3]. Для успешного исследования процесса засоления необходимо выделить главные факторы, обуславливающие направленность процессов «засоления – рассоления». Не останавливаясь на этих факторах подробно, знаем, что все они зависят от климата, типа почв, растительностей, глубиной залегания и энергией потока грунтовых вод, хозяйственной деятельностью человека. Причем все эти факторы можно исчислять численно, т.е. миграцию солей можно рассматривать как с качественной так и с количественной стороны. В работах [2, 4] проанализированы существующие математические модели процессов солепереноса и соленакопления в почвогрунтах, основанных на

закономерностях физико – химической гидродинамики пористых сред, критический анализ научных исследований по вопросам конвективной диффузии, растворения солей, сорбции и ионного обмена в горных породах. Здесь также рассмотрены дифференциальные уравнения, которые описывают процессы миграции солей, приводятся методы определения параметров, существования некоторых математических связей между ними.

В работе [2] дана попытка вскрыть механизм движения солей в почве и показать количественное взаимодействие существующих факторов. При этом он использует следующее уравнение, для расчета увеличения минерализации грунтовых вод $UC_x = -v \cdot C^n$, где U - скорость испарения грунтовых вод, C - концентрация солей, v - коэффициент диффузии, x - координата, направленная вниз, t - время, $n = 0; 0,5; 1$.

Данное уравнение получено из равенства в равновесном случае двух потоков солей (конвективного и диффузионного) в произвольном сечении грунта параллельному свободной поверхности. Однако теоретическая зависимость, полученная из этого уравнения, не может претендовать на общность хотя бы потому, что получена она на основании гипотез с определенными физико–химическими допущениями. Предположения о том, что можно найти единую зависимость для всей зоны солепереноса, независимо от структуры грунта и характера режима влаги в нем, не соответствует действительности. На самом деле, изменения в зоне солепереноса структуры грунта и режима грунтовых вод, резко меняются закономерности изменения концентрации. И, тем не менее, вышеприведенное уравнение позволяет дать некоторые теоретические зависимости, применимые к расчету миграции солей в простейших случаях. Автором работы [2], при исследовании фильтрации жидкостей через пористую среду в условиях их физико–

химического взаимодействия, рассмотрено совместно уравнения фильтрации и солепереноса. Математическая модель, составленная из представляет собой замкнутую систему дифференциальных уравнений, которые описывают фильтрацию воды в грунте (по закону Дарси и уравнению неразрывности потока жидкости), а также уравнению солевого баланса для потока грунтовых вод при наличии вертикальной и горизонтальной составляющих вектора скорости фильтрации $V_x = -kH_x$, $V_y = -kH_y$, (1) -уравнения Дарси, $V_{xx} + V_{yy} = 0$ - уравнение неразрывности, $V_{xx} + V_{yy} + \gamma\mu(C_0 - C) = \mu C_t$ (2) - уравнение солевого баланса, где $V_x = -u_x C + \mu DC_x$, $V_y = -v_y C + \mu DC_y$ - составляющие вектора скорости потока. При некоторых ограничениях, накладываемых на коэффициенты влаго-и солепереноса, а также допущениях, не противоречащих физике процесса, решение указанной системы уравнений сводится к решению следующего уравнения

$$\mu C_t = \mu D(C_{xx} + C_{yy}) - u_x C_x - v_y C_y + \gamma\mu(C_0 - C), \quad (3)$$

где u_x, v_y - компоненты вектора скорости фильтрации v , соответствующие осям Ox и Oy и определяемые из уравнения фильтрации, D -коэффициент диффузии, C_0 - концентрация солей в растворе, γ - константа растворения, μ - пористость грунта, x, y, t - соответственно плоские и временная координаты. Уравнение (3) описывает движение солей в водонасыщенном грунте и широко известно в теории миграции солей и влаги. Оно справедливо для несжимаемой жидкости и наличия фильтрации и диффузии только в направлении осей Ox и Oy .

В случае одномерной задачи для диффузии и независимости скорости фильтрации v от координаты Oy уравнение (2) будет иметь

$$\text{вид} \quad C_t = DC_{xx} - \frac{v}{\mu} C_x + \gamma(C_0 - C). \quad (4)$$

Если фильтрация водно – растворимых солей не сопровождается физико – химическим взаимодействием со средой (отсутствуют процессы сорбции, кристаллизации, растворения), то уравнение (4) может быть заменено более простым

$$m_0 C_t = DC_{xx} - vC_x. \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что процесс фильтрации веществ через пористые среды имеет диффузионный характер. Физическая сущность движения солей в породах рассматривается как конвективная диффузия, обусловленная вынужденной конвекцией фильтрационного потока с наличием растворения, выноса солей.

Для расчета промывок засоленных почв, [4] предлагает использовать уравнение (4) при следующих начально - краевых условиях $C(x,0) = C_0$, $C(0,t) = C_1$, $C(h,t) = C_2$ (6)

где C_0 - концентрация водного раствора солей в момент времени $t = 0$, C_1 - концентрация солей на входе потока $x = 0$, что соответствует дневной поверхности промываемой толщи, C_2 - концентрация солей на выходе при $x = h$. Приведенные в его работе количественные взаимоотношения факторов солепереноса могут быть использованы для составления мелиоративных прогнозов и расчета оптимального управления водно – солевым режимом орошаемых почв. Указано на возможность количественной характеристики солевого режима почв и грунтовых вод с помощью достижений гидродинамики, механики, теории диффузии, переноса. В работе [4] предпринята попытка определить количественную связь между водным и солевым режимом почв в условиях орошения. Авторами этой работы решена задача при упрощающих предположениях о постоянстве скорости фильтрации, коэффициента диффузии и дан прогноз изменения концентрации солей в почвенном растворе в стационарном и нестационарном случаях. При решении уравнения (5) для неустановившегося режима на поверхности почвы принималось условие, учитывающее

поступление солей вместе с минерализованной водой, а также с учетом того, что соли не выходят за границу капиллярной каймы при испарении. Данная работа дала толчок к развитию количественных исследований в мелиорации засоленных почв. Случай, когда начальное распределение солей в почвогрунтовой слое неравномерно по глубине, оно приблизительно заменяется ломаной или ступенчатой функцией. Решения в [4] были получены в предположении независимости скорости движения раствора от его концентрации. Однако в случае сильно засоленных почв концентрация раствора может достигать значений концентрации предельного насыщения, что приводит к значительному изменению скорости фильтрации при прочих равных условиях.

Для устойчивого засоления почв при малом содержании солей, находящихся в твердой фазе, в [4] было получено решение стационарного уравнения солепереноса

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial (vC)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

с краевыми условиями

$$D^* C_x + vC = 0 \quad \text{при} \quad x = 0 \quad \text{и} \quad C = C_h \quad \text{при} \quad x = h. \quad (8)$$

При этом скорость конвективного переноса инфильтрационных вод v принималось постоянной независимой от влажности почвы в пределах рассматриваемой зоны. Граничные условия общеизвестны т.е. D^* -среднее значение коэффициента конвективной диффузии солей в зоне аэрации. Первое условие говорит об изолированности ($x = 0$) для потока солей в атмосферу, а второе задает постоянную во все время протекания процесса концентрации на границе области ($x = h$).

Если рассматривается задача неглубокого залегания подземных грунтовых вод, когда все соли выносятся в верхние слои почвы, то перенос солей при наличии испарения концентрация в них будет

близок к концентрации насыщения, т.е. $C = C_n$ - имеющим место на поверхности почв, C_n - концентрации предельного насыщения раствора солями. Равенство (4) заменяется более точным соотношением на поверхности почвы $\mu DC_x + vC = 0$, (9) где μ - пористость почвы.

Последнее условие выводится из условия движения солей вместе с раствором. Аналитическое решение уравнения солепереноса с учетом члена, описывающего растворения солей $\gamma \neq 0$ получено в [4], где исследован случай выноса солей из почвы вместе с испаряющейся влагой при $C_x = 0$.

При рассмотрении нестационарного изменения концентрации на границах, [2,4] берут диффузионное уравнение вида

$$D^* C_{xx} + vC_x = C_t, \quad (10)$$

с граничными условиями (6), а начальное как $C(0, x) = C_1$, т.е. влага имеет постоянную концентрацию грунтовых вод.

Для практических целей мелиорации, представляет интерес изучение солевого режима почвогрунтов как в естественно – сложившихся условиях, так и при орошении не только в зоне полного насыщения грунтов водой, но и ниже уровня грунтовых вод. В работе [4] приводятся аналитические решения системы двух уравнений для случая установившегося и неуставившегося режима грунтовых вод, позволяющие делать прогнозы солевого режима почвогрунтов при орошении. Однако на практике имеют место как прогрессирующий во времени подъем уровня грунтовых вод в случае орошения, так и значительное его понижение в условиях испарения. Процесс является нестационарным. Кроме того, в моделях указанных выше авторов, при рассмотрении миграции солей и влаги в почве в естественных условиях и при орошении, не учитывалось горизонтальное движение потока грунтовых вод, не определилась связь между существующими

водно-солевыми режимами почв и потоком грунтовых вод. В то же время, скорость грунтовых вод и их минерализация, существенно влияют на распределение концентрации солей в почве. Можно заметить, что учет только лишь вертикального движения влаги в почве приводит к необходимости задания на некоторой глубине значения концентрации, которая фактически является неопределенной переменной величиной. В работе [2], это затруднение устраняется тем, что слой почвы с вертикальным движением влаги в ней предполагается полубесконечным. Однако нижней границей зоны неполного насыщения служит уровень грунтовых вод, имеющий резко нестационарный характер и изменяющийся с изменением характеристик среды (коэффициента пористости, коэффициента фильтрации и водоотдачи и т.п.), а также в зависимости от условий на свободной поверхности потока и на его границах.

В [2], было предложено, что при изучении миграции солей в почвогрунте необходимо рассматривать их как единый почвенно-гидрогеологический процесс от дневной поверхности до первого регионального водоупора. Это позволило учесть многие важные для мелиорации параметры (как например, скорость потока грунтовых вод, мощность водоносного пласта, глубину залегания грунтовых вод и т.д.). При аналитическом решении использовались совместно уравнение конвективной диффузии (1, 2, 4), имеющей место в капиллярной кайме и уравнение баланса солей в потоке грунтовых вод. Изменение депрессионной кривой вдоль по потоку в стационарном состоянии находилось из решения уравнения для фильтрационного потока. В дальнейшем эта математическая модель была заменена более точной [4]. В ней предлагается рассматривать нестационарную фильтрацию потока в грунте и решать соответствующее этому движению грунтовых вод уравнение Буссинеска.

В практике мелиоративных расчетов, сравнительно редко встречаются случаи, когда фильтрация и массообмен происходят в однородных изотропных грунтах. Как правило, грунт состоит из пластов, которые отличаются по механическому составу и водопроницаемости.

Вопросы распределения солей при вертикальной фильтрации в слоистом почвогрунте рассматривались в работах [2,4]. Авторы дают численное решение модели, представляющей собой систему двух дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми условиями. Целый ряд интересных и практически важных задач был решен методом, основанным на количественном рассмотрении данного процесса.

Таким образом, анализ существующих математических моделей солепереноса дает нам возможность выбрать один из них или дополнить их соответствующими членами и решить начально – краевые задачи.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Ковда В.А., Происхождение и режим засолен. почв. Т.1,2. М., 1946 - 1947г.г.
2. Веригин Н.Н. Основы теории растворения и выщелачивания солей при фильтрации воды в горных породах и грунтах. В кн.: «Инженерно – геологические свойства горных пород и методы их изучения». М., 1962.
3. Ботолаева Г.К., Основные факторы, влияющие на засоление и деградацию почвогрунтов и анализ их устранения. В наст. сборнике.
- 4.Соколенко Э.А. и др. Количественные методы в мелиорации засоленных почв.// «Наука» Казахской ССР., 1974.- 175с.