

РЕЖИМНО-БАЛАНСОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВОДНО-СОЛЕВОГО РЕЖИМА ОРОШАЕМЫХ ПОЧВ

Э.Т. Пягай

Проблема прогнозирования мелиоративных ситуаций на орошаемых или осушаемых землях является одной из важнейших задач современного земледелия. Ее решением занимаются специалисты самых разных профилей: от биологов до математиков. Однако наибольших успехов в практическом использовании современных достижений в области моделирования природных процессов, протекающих в системе «подземные воды–почва–растение–атмосфера», для решения прогнозных задач достигли гидрологи, гидрофизики и мелиораторы.

В данной статье рассматривается один из частных вопросов, связанных с прогнозированием, а именно организация и методика проведения режимно-балансовых исследований при прогнозировании водно-солевого режима орошаемых почв.

Современные требования к оптимизации мелиоративного режима почв аридной зоны предусматривают решение широкого круга задач, связанных как с регулированием, так и прогнозированием их водно-солевого режима (**ВСР**), что вызвано, в частности, подъемом уровня (обычно минерализованных) грунтовых вод. Решение таких задач возможно лишь при наличии всех количественных составляющих влаго- и солеобмена в системе грунтовые воды–почва–растения–атмосфера. Это обусловлено тем, что в районах с засушливым климатом при близких грунтовых водах формирование ВСР почв происходит сложным образом и не поддается простой схематизации (идеализации). Вместе с тем, анализ результатов балансовых исследований на орошаемых землях показал, что многообразие факторов, оказывающих влияние на ВСР, обуславливает не только различия, но и некоторое их единообразие. Так, данные по инфильтрационному питанию грунтовых вод на орошаемых массивах, получаемые в различных регионах страны, свидетельствуют о том, что несмотря на существенные различия в климатических, геолого-гидрологических и почвенно-мелиоративных условиях, а также гидрофизических свойствах почв, режима их увлажнения (поливов) и других отношение величины инфильтрации влаги к оросительной норме меняется незначительно. При этом независимо от режима влагопереноса в почвенно-грунтовой толще (**ПГТ**) (при большой ее мощности) выделяются три зоны: зона сезонных колебаний влажности почвы, обусловленных сменой процессов увлажнения-сушки, зона постоянных значений влажности и зона капиллярной каймы, положение

которой меняется в зависимости от подъема или спада уровня грунтовых вод. Для случая, когда интенсивность инфильтрации почвенной влаги (v) связана с всасывающим движением (Ψ) соотношением вида (Пягай, Гушин, 1988).

$$\Psi = -1/\beta \ln [v/k (e^{-l} - 1) + e^{-l}], \quad (1)$$

установившийся режим влагопереноса возможен при значениях $l > 3$. Тогда выражение (1) примет вид

$$\Psi = 1/\beta \ln v/k, \quad (2)$$

из чего следует, что профиль влажности в ПГТ зоны аэрации остается неизменным.

При близком залегании грунтовых вод, когда в зоне аэрации формируются в основном нестационарные потоки, охарактеризовать водный и солевой режимы почв можно лишь на основе режимно-балансовых исследований, позволяющие

- контролировать направление движения потока влаги и солей в ПГТ;
- оценить интенсивность влаго- и солеобмена в ПГТ в поливной и межполивной период;
- определить водный и солевой баланс корнеобитаемого слоя почвы и нижележащей почвенно-грунтовой толщи за расчетный промежуток времени;
- установить динамику насыщения межбороздкового пространства почвы при сосредоточенном (по бороздам) поливе в зависимости от нормы орошения;
- определить параметры миграции влаги и солей в ПГТ;
- установить особенности и закономерности формирования режима влаго- и солепереноса в ПГТ с учетом влияния различных природных и мелиоративных факторов;
- оценить динамику насыщения (μ°) почвогрунтов при подъеме и водоотдачи (μ_o) при спаде уровня грунтовых вод и др.

Для случая, когда кривая водоудерживающей способности почвы аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, расчетная формула недостатка насыщения (μ°) с учетом (1) примет вид

$$\mu^\circ = (\theta_p - \theta_o) [1 - (v/k)^{a/\beta}]. \quad (3)$$

Анализ этой зависимости показывает, что μ° есть величина переменная и в зависимости от скорости влагопереноса и положения уровня грунтовых вод может изменяться в достаточно широких пределах. По мере возрастания v значение μ° уменьшается и, наоборот, возрастает при уменьшении v ; такая же особенность уменьшения (увеличения) наблюдается и в динамике водоотдачи (μ_o) при снижении (повышении) уровня грунтовых вод. Принимать значения μ° (или μ_o) постоянным можно лишь при длительных и однонаправленных изменениях (подъеме

или спаде) уровня грунтовых вод. На орошаемых массивах эти условия соблюдаются, по-видимому, в почвах лишь автоморфного ряда, где мощность ПГТ, обуславливающую эту аэрацию, в несколько раз превышает полный профиль капиллярной каймы.

Для изучения режимов и процессов, протекающих в ПГТ, а также оценки параметров миграции почвенного раствора в настоящее время используется множество различных экспериментальных и расчетных методов. Однако их некоторая разобщенность, обусловленная различиями подходов к изучению ВСР орошаемых земель, делает сложным, а в ряде случаев и невозможным, решение оптимизационных и прогнозных задач. В связи с этим предлагается целостная система расчетно-экспериментальных методов изучения ВСР орошаемых почв, обеспечивающая проведение режимно-балансовых исследований, которые сами по себе являются комплексными и универсальными в плане информативности полученных данных. При наличии базовых (режимно-балансовых) материалов представляется возможным широкое использование математического моделирования как важнейшего метода научного познания мелиоративных режимов и процессов, протекающих в ПГТ, без проведения дорогостоящих, а в ряде случаев и невозможных натуральных экспериментов. Для этого режимно-балансовые исследования дополняются гидрофизическими и гидрохимическими исследованиями, основанными на теории влаго- и солепереноса в пористых средах (почвогрунтах). Не останавливаясь на традиционных режимных и балансовых исследованиях, поскольку они достаточно подробно изложены в научной литературе, рассмотрим лишь методику гидрофизических и гидрохимических исследований на ключевых участках или опытных площадках (гидрофизических точках), оборудованных лизиметрами (или гидрофизическими шурфами), пьезометрами и гидрометеорологическими приборами для измерения, в частности, скорости ветра, температуры и влажности воздуха.

В практике мелиорации обычно лизиметрические наблюдения проводятся при постоянном уровне воды в этих установках, что значительно снижает ценность исследований. Вместе с тем, в реальных условиях, соответствующих эксплуатационному периоду освоения земель, когда роль грунтовых вод в формировании водно-солевого баланса почв весьма значительна, учет дренированности территории представляется обязательным. Для этого используется лизиметр, оборудованный сливным устройством, на котором устанавливается дополнительное сопротивление, эквивалентное фильтрационному сопротивлению потока с расчетом на сечение или на междуренье. При таком подходе результаты исследования ВСР почв в лизиметрах могут быть приурочены к опреде-

лентным участкам на междуренье, что позволит оценить эффективность различных вариантов дренажа.

В автоморфных почвах изучение их ВСР должно проводиться в глубоких лизиметрах (5 м и более). При отсутствии в них слива ведется моделирование скорости подъема уровня грунтовых вод при различных режимах орошения и определение параметра (коэффициента) μ° , характеризующего недостаток насыщения. Кроме оценки инфильтрационного питания и коэффициента насыщения почвогрунтов, в этих лизиметрах можно исследовать процессы влаго- и солепереноса при орошении и промывках. При наличии сливного устройства положение уровня воды в лизиметре (напор) задается через дополнительное сопротивление, значение которого определяется параметрами дренажа и свойствами почвогрунтов. Рассчитать фильтрационное сопротивление горизонтального дренажа можно по известной зависимости

$$\Phi = L/8T + L^\circ/T + m/K\pi r^2, \quad (4)$$

где L – междреннее расстояние; L° – сопротивление несовершенства дренажа; T – проводимость водоносного горизонта; m и K – мощность и коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя; r – радиус лизиметра); для расчета Φ вертикального дренажа можно ограничиться рассмотрением лишь последнего члена

$$\Phi = m/K\pi r^2. \quad (5)$$

По этой зависимости моделируемый напор в лизиметре соответствует напору в водоносном горизонте. Задавая экспериментально различные его значения, отыскивается наиболее благоприятный ВСР почв и условия работы вертикальных дренажных скважин. При этом следует иметь в виду, что высота лизиметра и моделируемый в нем напор должны быть обоснованы соответствующими исследованиями и расчетами.

Кроме лизиметрических экспериментов, на ключевых участках должны быть организованы наблюдения за гидрометеорологическими параметрами, испарением почвенной влаги, режимом грунтовых вод и влажности почвогрунтов, динамикой засоления и состава порового раствора. Рассмотрим более подробно методику изучения лишь ВСР почвогрунтов, поскольку другие наблюдения достаточно полно изложены во многих методических руководствах и указаниях.

Изучение процессов влаго- и солепереноса в ПГТ целесообразно проводить на специальных опытных площадках (гидрофизических точках), оборудованных радиометрической скважиной с заглушкой снизу, пьезометром, тензиометрами, датчиками для измерения температуры почвы и отбора порового раствора. Их установка в приповерхностном слое почвы проводится с интервалом по глубине 20–30 см, а в зоне постоянной влажности и в капиллярной кайме – через 50–100 см в зависимости от литологического строения ПГТ. В периоды, когда почва промерзает,

тензиометрические наблюдения можно проводить лишь при их заправке незамерзающей жидкостью.

Для установки тензиометров, термометров и датчиков для определения концентрации (или отбора) порового раствора целесообразно использовать шурфы длительного пользования. На орошаемых землях, когда уровень грунтовых вод залегает на глубине до 10 м, закладывается шурф до воды и даже на 1.5–2 м ниже. Затем колодец-шурф снизу и с боков армируется водонепроницаемым материалом (асбестобетонные кольца, металлическая труба и др.); затрубное пространство или щель между каркасами и стенкой шурфа тампонируется глинистым или цементным раствором. Зонд для отбора порового раствора (или ионселективного электрода), тензиометры и термометры в почву устанавливаются через отверстия в стенке каркаса шурфа-колодца; аналогичным образом фиксируются эти приборы и датчики в лизиметрах (Пягай, Хаматов, 1991).

Для измерения влажности почвогрунтов предлагается использовать термостатно-весовой и радиометрический методы; во втором случае удобно пользоваться серийными влагомерами НИВ-2 или ВПГР-2. При этом следует иметь в виду, что между радиометрической скважиной и обсадной трубой не должно быть зазора. При тщательной тарировке прибора нейтронный способ дает удовлетворительную точность в определении влажности почвы.

Наблюдение за всасывающим давлением проводится с помощью тензиометра, который состоит из зонда (пористого фильтра), соединительной системы, воздухоулавливателя и манометра; в рабочем состоянии вся система, заполненная водой, должна быть герметична.

В качестве пористого фильтра могут быть использованы полый керамический цилиндр (свеча Чемберлена) или керамическая пластина, приклеенная к стеклянной воронке. Соединение зонда с манометром и воздухоулавливателем, изготовленным из стекла, проводится с помощью стеклянных, медных, алюминиевых трубок и вакуумного резинового шланга; для измерения отрицательного давления в системе тензиометра можно использовать ртутный (или водяной) манометр различной конструкции и образцовый вакууметр.

Установка тензиометра в почву проводится в следующей последовательности. Вначале в стенки шурфа (или с поверхности почвы) выбуриваются отверстия (диаметром, соответствующим керамическому датчику) под углом 10° – 15° в направлении заданной точки (глубины). После этого стенки отверстия смачиваются водой, а затем устанавливается сам датчик, предварительно заполненный водой; операция с увлажнением отверстия и датчика необходима, с одной стороны, для облегчения его сдвигания, а с другой – для обеспечения надежного контакта с почвой. При правильной установке тензиометра вода из пористого фильтра

вытекает в окружающую почву и внутри системы создается разрежение, эквивалентное по величине всасывающему давлению почвы. Переход от разностей ртутных столбов манометра к всасывающему давлению при различных положениях измерительной системы и точки отсчета (нулевого положения) проводится по известным зависимостям. При этом следует иметь в виду, что тензиометрические наблюдения можно проводить только до давления барботирования (проскока воздуха через пористый зонд) тензиометра, соответствующего примерно 80–85 кПа. Время установления равновесия давления в почве и тензиометра определяется проницаемостью керамического датчика, точность измерения достаточно высокая и составляет 0.5–0.7 кПа. В орошаемых почвах влажность даже в корнеобитаемом слое, как правило, не выходит за пределы работы тензиометра, следовательно, его применение для режимных наблюдений за всасывающим давлением в верхней зоне активного иссушения ограничивается в основном поливным периодом; в нижележащей ПГТ тензиометрические измерения можно проводить практически круглогодично. При этом интервал установки тензиометров по глубине ПГТ, а также частота измерения всасывающего давления и влажности почвы определяются задачами исследований. Для изучения ВСП орошаемых почв частота их измерения по глубине может быть дифференцирована. Так, в зоне сезонных колебаний влажности частота измерений меняется от одного раза в сутки сразу после полива до одного раза в 3–5 сут; в зимний период можно ограничиться 2–3 измерениями всасывающего давления и влажности почвы в месяц. Для песчаной ПГТ глубина сезонных колебаний влажности весьма значительна и может составлять десятки метров, для супесчаной толщи – более 5 м, а для ПГТ, сложенной суглинком, – до 3–4 м. В зоне относительно постоянной влажности наблюдения за всасывающим давлением и влажностью почвы можно проводить не чаще одного раза в декаду. В капиллярной кайме эти измерения должны сопровождаться замерами уровня грунтовых вод с частотой примерно 1–2 раза в декаду в поливной период и 2 раза в месяц в неполивной.

Для отбора порового раствора, на основе чего строятся выходные кривые концентрации от времени, и рассчитываются параметры солепереноса, целесообразно использовать керамические фильтры (зонды). Их установка в почву проводится аналогичным образом, что и датчиков тензиометров, но с наклоном в противоположную сторону для свободного вытекания раствора из полости зонда.

Отбор пробы из почвы проводится следующим образом. К керамическому фильтру с помощью вакуумного шланга подсоединяется емкость с двумя выходами (колба Бунзена); второй выход соединен с вакуумным насосом. Перед началом каждого опыта вся система, контакти-

рующая с жидкостью, промывается дистиллированной водой. Затем в системе создается разрежение, в результате чего почвенный раствор всасывается вначале в полость зонда, а затем в приемную емкость. Объем пробы для анализа зависит от концентрации раствора; минимальное его количество должно быть порядка 20 мл. Частота отбора порового раствора зависит от гидрофизических и гидрохимических параметров почвы и должна быть конкретизирована по ходу эксперимента. Продолжительность отбора пробы может быть ориентировочно рассчитана по следующей зависимости:

$$G^{\circ} = (10 - z + h \ln \bar{O}), \quad (6)$$

где G° – скорость потока воды через зонд при разрежении 98.6 кПа; z – глубина установки зонда относительно водосборной емкости; h – высота капиллярного поднятия; $\bar{O}$ – относительная влажность почвы. В супесчано-суглинистых почвах время отбора минимального количества порового раствора обычно не превышает 20–25 мин.

Кроме прямых методов определения концентрации почвенного раствора, в практике мелиорации широкое распространение получили и косвенные, основанные, в частности, на электропроводности.

Однако хорошо известно, что электрическое сопротивление дисперсных почв является сложной функцией их минерального и гранулометрического составов, состава обменных катионов, степени водонасыщенности и концентрированности поровых растворов, плотности, а также их структурно-текстурных особенностей.

Сложная зависимость электрического сопротивления почвогрунтов (R_n) от многих факторов не позволяет однозначно интерпретировать данные R_n , полученные в точке. Однако для полностью водонасыщенных почв и грунтов изменения электрического сопротивления в значительной мере обуславливается изменением концентрации порового раствора при условии постоянства прочих характеристик почвы. Следовательно, в таких почвах использование электрических методов для определения параметров солепереноса вполне возможно.

Для оценки электрометрического метода определения концентрации порового раствора и достоверности интерпретации его результатов необходимо в лизиметре установить керамические фильтры для отбора проб порового раствора и электрометрические зонды.

Следует отметить, что измерение электрических свойств почв и грунтов можно проводить по двух- и четырехэлектродной схемам. Каждая из этих схем имеет свои преимущества и недостатки.

При работе по двухэлектродной схеме обычно используется переменный ток, что позволяет избавиться от поляризации электродов, вносящих ошибки в измерение электрических параметров почвы. В то же время при работе по этой схеме следует опасаться переходных сопро-

тивлений, которые возникают из-за плохого контакта между электродами и почвой. Величины переходных сопротивлений могут достигать столь высоких значений, что о количественной интерпретации результатов не может быть и речи. Поэтому двухэлектродная электрическая измерительная схема, как правило, применяется в полностью насыщенных почвах, где переходные сопротивления либо отсутствуют вовсе, либо пренебрежимо малы.

Применение четырехэлектродной схемы, имеющей питающую и измерительную цепи, позволяет избежать контактных сопротивлений при измерении электрических свойств почвы. Однако использование постоянного тока в этой схеме вызывает некоторую поляризацию электродов, и тем большую, чем выше влажность грунта, что может сказаться на результатах измерений. Вследствие этого определение электрических свойств грунта по четырехэлектродной схеме проводится в ненасыщенных почвогрунтах. Во избежание поляризации электродов измерение R должно проводиться переменным током частотой около 1000 Гц; в качестве источника переменного тока можно использовать генератор звуковой частоты; нульинструментом служит микроамперметр. Точность измерений по этой схеме составляет 2-5%. Для определения удельной электропроводности исследуемого почвогрунта применялся зонд, который был изготовлен в виде конусообразного эбонитового стержня длиной 30 см с двумя кольцевыми свинцовыми электродами на тонком конце, расположенными друг от друга на расстоянии 4 см. Чтобы исключить влияние металлической стенки, зонд устанавливался в почву через отверстия в боковой поверхности лизиметра на всю свою длину.

Поскольку электрическое сопротивление почвы представляет собой величину абсолютную, зависящую от геометрии электродов, а поэтому непригодную для сравнения результатов между собой, то гораздо удобнее воспользоваться величиной удельной электропроводности почвы (χ), свободной от этих недостатков.

Удельная электропроводность грунта рассчитывается по формуле

$$\chi = K^\circ / R^\circ, \quad (7)$$

где $R^\circ = R_n [1 + (t - 18^\circ\text{C}) 0,02]$, t - температура, при которой определялось электрическое сопротивление почвы R_n ; R° - электрическое сопротивление почвы, приведенное к 18°C .; K° - постоянная зонда, определяемая по эталонному раствору KCl 0.01н. концентрации; K° - рассчитывается по формуле

$$K^\circ = \chi^\circ R_o, \quad (8)$$

где χ° - удельная электропроводность эталонного раствора (табличные данные); R_o - измеренное сопротивление эталонного раствора KCl .

Для определения параметров влагопереноса по данным режимных наблюдений целесообразно на опытных участках организовать масштабные эксперименты по искусственному увлажнению почвенно-

грунтовой толщи. Одним из вариантов опыта является залив микро-, мезо- и макрочек (обвалованной площадки); размеры чека определяются глубиной опробования почвенно-грунтовой толщи. Налив в такой чек необходимо проводить вблизи или вокруг гидроизолированного шурфа желательнo на фоне исследуемого растительного покрова.

На первом этапе такого налива, весьма краткосрочного, определяется динамика водопоглощения с поверхности почвы и коэффициент фильтрации. Впоследствии, после окончания процесса впитывания воды, режимные наблюдения за влажностью, всасывающим давлением, солевой динамикой и температурой почвы используются для определения параметров влаго-, соле- и теплопереносов.

Налив проводится минимум в течение 6 ч, после его прекращения ведется наблюдение за перераспределением влаги в почве по тензиометрам, установленным в стенках шурфа, и бурение на влажность почвы. Синхронные наблюдения позволяют построить кривую водоудержания для ветви иссушения. В последствии данные наблюдений за всасывающим давлением и влажностью по глубине ПГТ используются для определения коэффициента влагопроводности (k) Расход влаги (v) через выбранное сечение почвы определяется балансовым методом по эпюрам влажности на два момента времени. При известных v и Ψ коэффициент влагопроводности рассчитывается по формуле

$$k = vz/(\Psi_{ii} - \Psi_i) - z, \quad (9)$$

где Ψ_{ii} и Ψ_i – значения всасывающего давления в двух точках почвенного профиля; z – расстояние между точками установки тензиометров.

Значения Ψ_{ii} и Ψ_i определяются в зависимости от средней влажности за наблюдаемый период времени. Для нахождения эмпирических параметров аппроксимации кривой влагопроводности почвы целесообразно значения каждой пары K и $\bar{O}$ нанести на график теоретических кривых влагопроводности, вычерченных в логарифмических координатах. В этих координатах искомые зависимости имеют вид прямых с различным углом наклона. Для нахождения параметров аппроксимации кривой влагопроводности по этому способу теоретические кривые зависимости K от $\bar{O}$, вычерченные для удобства на прозрачной бумаге, накладываются на график экспериментальных точек K от $\bar{O}$; перемещая по вертикальной оси график K от $\bar{O}$ находим теоретическую кривую, на которую укладываются все экспериментальные точки; по величине смещения определяется предельное значение коэффициента влагопроводности, соответствующее коэффициенту фильтрации, а по наклону кривой – эмпирический параметр аппроксимации кривой K от $\bar{O}$.

Данные полива на опытной площадке можно использовать также для характеристики фильтрационной однородности почвы. Изучение этого

вопроса представляется весьма важным, в особенности в суглинистых, хорошо оструктуренных почвах. Для таких почв характерно наличие макропор и трещин, которые оказывают существенное влияние на процессы миграции влаги. Количественным показателем гетерогенности строения почвы И.С. Пашковский (1973) предлагает считать параметр τ , характеризующий время влагообмена между хорошо- и слабопроницаемыми почвенными образованиями (между пустотами и агрегатными образованиями). Для его определения можно воспользоваться данными общеизвестных наливов на водопроницаемость по методу Болдырева–Нестерова. Далее, полагая, что для большинства почв кривая скорости впитывания влаги (V) до момента установившейся (или квазиустановившейся) фильтрации описывается зависимостью вида (Пягай, Эм Ги-Чель, 1998)

$$V = V_{\max} e^{-at} + k(1 - e^{-at}), \quad (10)$$

где $V_{\max}$ – максимальная скорость впитывания на начало налива; k – коэффициент фильтрации; t – время налива; a – эмпирический параметр аппроксимации кривой впитывания. Представим это уравнение в виде

$$V = (V_{\max} - k) e^{-at} + k, \quad (11)$$

из которого следует, что определить a можно по графику зависимости $\ln(V - k)$ от t . Этот график, имеющий вид прямой, отсекает на оси ординат величину $\ln(V_{\max} - k)$, характеризующую скорость насыщения почвы до полной влагоемкости; угол наклона $\ln(V - k)$ от t соответствует $1/\tau$.

Кроме этих специальных экспериментальных исследований, на ключевых балансовых участках должны быть организованы наблюдения за метеорологическими параметрами приземного слоя воздуха:

- динамикой колебания уровня и минерализации грунтовых вод по режимной сети скважин;
- дренажным стоком и его минерализацией;
- расходом воды на орошение и промывку;
- температурным режимом почвы;
- динамикой роста и развития растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

Пашковский И.С. Методы определения инфильтрационного питания по расчетам влагопереноса в зоне аэрации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 119 с.

Пягай Э.Т., Гуцин В.П. Определение гидрофизических параметров почв и их достоверность. //Актуальные вопросы агрономического почвоведения. Науч. тр. ТСХА. М., 1988. С. 28-37.

Пягай Э.Т., Хатамов А.А. Оптимизация режима орошения хлопчатника. Ашхабад: Ылым, 1991. 154 с.

Пягай Э.Т., Эм Ги-Чель. Методика прогноза водно-солевого режима орошаемых почв аридной зоны. М.: Изд-во РУДН, 1998. 394 с.