МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД И ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ИХ СБРОСЕ НА БОЛОТА

© 2018 г. С.А. Лавров

ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: математическое моделирование, гидрофизические и сорбционные свойства, сточные воды, загрязняющие вещества, болота.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки методики численной оценки влияния сброса сточных вод на болота с учетом многофакторности данного процесса. Предложена и впервые реализована пространственно двухмерная математическая модель с учетом гидрофизических и физико-химических свойств торфяной залежи, позволяющая имитировать различные технологические приемы и процесс распространения загрязняющих веществ при сбросе сточных вод на болотные массивы.

Объектом моделирования являлся болотный массив, расположенный в междуречье рек Золотицы и Светлой Архангельской области, для которого в результате полевых исследований были определены все основные гидрофизические, гидрохимические и геофизические характеристики. Разработан и реализован специальный информационно-моделирующий комплекс в среде MapInfo, позволяющий проводить имитацию процесса сброса сточных вод на экране монитора. Выполнены численные оценки влияния гидрологических, гидрофизических, гидрохимических и сорбционных свойств болотных массивов, геометрии и технологии сброса на процессы растекания сточных вод и распространение загрязняющих веществ в пределах деятельного слоя болот. Показано, что использование для очистки слоев торфяной залежи с коэффициентами фильтрации от 0,5 до 200 см/с увеличивает водопрпускную способность болота от 2 до 720 м³/ч. Но при этом продолжительность очистительной способности болота сокращается от 5 лет до 1 месяца. Полученные результаты позволяют оценить фактические последствия использования болот в качестве дополнительных очистных сооружений и принимать решения о целесообразности проведения данного мероприятия.

С.А. Лавров

В соответствии со ст. 5 Водного кодекса Российской Федерации болота относятся к поверхностным водным объектам [1]. Несмотря на правовой статус болот, отсутствует регламентирование водоотведения сточных вод на болота, не разработаны принципы расчета нормативно допустимых сбросов (НДС). Проведенный анализ фактического распространения различных видов хозяйственной деятельности на болотах и, в частности, сброса сточных вод, выполненный на основе открытых данных бассейновых водных управлений (БВУ) и автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО), показывает увеличение масштабов хозяйственного освоения болот. Привлекает способность болот к самоочищению природных и сточных вод, обладающих большой сорбционной способностью и емкостью к подвижным формам различных химических соединений. Однако зачастую сброс осуществляется стихийно, без достаточного научного обоснования последствий воздействия хозяйственной деятельности на болотную экосистему.

Оценка последствий воздействия сброса сточных вод на болота невозможна без ясного представления о процессах распространения и трансформации потоков воды и химических ингредиентов в болотном массиве. В первую очередь, необходимо создать методы количественной оценки изменения гидрологических и гидрохимических характеристик болотного массива при сбросе сточных вод. При этом следует решить следующие задачи: расчет трансформации и поглощения загрязняющих веществ торфяной залежью и емкостных возможностей болотного массива; выбор оптимальной геометрии и технологии сброса сточных вод.

Одним из подходов к решению данных задач является метод математического моделирования процессов распространения сточных вод и загрязняющих веществ на болотных массивах. В рамках данной работы рассмотрено моделирование этих процессов в пределах торфяной залежи деятельного слоя болот.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД И ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Основные уравнения математической модели

Предлагаемая математическая модель базируется на основных закономерностях формирования стока на болотном массиве. Особенностью этих закономерностей является то, что стекание воды с болота продолжается лишь до тех пор, пока уровень болотных вод находится в пределах деятельного горизонта. Глубина данного горизонта зависит от типа болотного микроландшафта и, в основном, составляет 30–40 см от поверхности болота. В пределах деятельного слоя понижение уровня болотных вод, даже

на несколько сантиметров, зачастую приводит к уменьшению стока на порядок [2]. Таким образом, каждый нижележащий горизонт по отношению к верхнему можно рассматривать в качестве относительного водоупора. Поэтому растекание болотных вод, а в нашем случае – сточных вод, можно рассматривать как горизонтальное плоско- параллельное течение воды под действием силы тяжести.

Для расчета гидравлического растекания болотных (сточных) вод в пределах деятельного слоя воспользуемся уравнением неразрывности гидравлического потока:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dq}{dx} + \frac{dq}{dy} + I_a(t) + I_o(t) + I_o(t), \quad (1)$$

где h – толщина слоя растекания;

x, y – горизонтальные координаты расчетной точки поверхности болота;

q – горизонтальный поток болотных вод;

$I_a(t)$ – интенсивность поступления сточных вод на поверхность болота;

$I_E(t)$ – интенсивность испарения сточных вод;

$I_o(t)$ – интенсивность осадков;

t – время.

Как показывают предварительные оценки, течение сточных вод в подповерхностном слое торфа носит ламинарный характер. В этом случае расчет величины потока можно проводить по уравнению подобному уравнению Дарси:

$$q = K \cdot i, \quad (2)$$

где K – средний коэффициент гидравлической проводимости (коэффициент фильтрации) торфяной залежи; i – продольный уклон поверхности болота.

Для целей математического моделирования величину, например, уклон по координате x – i_x можно рассчитать как:

$$i_x = dz_n/dx = d(z_o + h)/dx, \quad (3)$$

где z_n, z_o – вертикальные координаты поверхности уровня болотных вод и поверхности болота. Аналогично рассчитывается и продольный уклон поверхности болота вдоль направления y .

Для расчета переноса загрязняющих веществ в болотном массиве с потоком сточных вод используется следующее уравнение [3].

$$R \frac{dC}{dt} = D_x \frac{d^2 C}{dx^2} + D_y \frac{d^2 C}{dy^2} + v_x \frac{dC}{dx} + v_y \frac{dC}{dy}, \quad (4)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества в жидкой фазе;

D_x, D_y – коэффициенты диффузии загрязняющих веществ;

q_x, q_y – скорости движения воды в торфяной залежи в направлении x и y ;

R – фактор удерживания.

Первые два члена правой части уравнения (4) описывают процесс диффузии загрязняющего вещества, третий и четвертый – процесс адвекции. Уравнение (4) получено из предположения, что миграция растворенного вещества в пористых средах происходит в условиях «локального равновесия», когда физико-химические взаимодействия (наиболее важные в нашем случае процессы адсорбции и десорбции) протекают за время, меньшее средней продолжительности пребывания растворенного вещества в пористой среде.

Фактор удерживания рассчитывается как:

$$R = 1 + \frac{\rho}{\theta} \frac{dS}{dC}, \quad (5)$$

где S – концентрация загрязняющего вещества в твердой фазе;

ρ – плотность сухой почвы;

θ – влажность почвы.

Этот параметр численно характеризует подвижность субстрата загрязняющего вещества относительно воды. Его можно также выразить как отношение скорости движения фронта растворенного в болотной воде загрязняющего вещества к скорости миграции фронта адсорбированного торфом загрязняющего вещества.

Сорбционный процесс (адсорбция–десорбция) химических веществ из раствора описывается так называемой изотермой сорбции. Изотерма сорбции – это графическое представление зависимости количества растворенного вещества, поглощенного адсорбентом, от равновесной концентрации этого вещества в растворе. Эта зависимость описывается уравнениями адсорбции нескольких типов, которые используются при обработке экспериментальных результатов. Наиболее широкое применение находит хорошо известное уравнение Фрейндлиха:

$$S = K_f \cdot C^{1/4}, \quad (6)$$

где K_f и n – специфические константы системы твердое тело – жидкость.

В случае линейной изотермы сорбции n равно 1, а уравнение Фрейндлиха сводится к более простому уравнению разделения Генри:

$$S = K_d \cdot C. \quad (7)$$

Характер взаимодействия в этом случае описывается константой K_d , которая является коэффициентом распределения загрязняющего вещества между жидкой и твердой фазами почвы. Линейная изотерма, как правило, описывает сорбцию из растворов низкой концентрации и является желательным упрощением, т. к. допускает более простые математические решения общего уравнения переноса (4). Наблюдаемые концентрации химических ингредиентов в болотных водах позволяют использовать данное упрощение.

Исходная информация

Объектом моделирования в нашем случае является болотный массив, расположенный в 100 км на север от г. Архангельска. Его предполагают использовать в качестве природного буфера для сброса и очистки минерализованных дренажных вод с карьера при добыче алмазонасной породы. Болото расположено в междуречье рек Золотицы и Светлой, на расстоянии 2,3 км вверх по течению от их слияния. Данный болотный массив относится к болотам олиготрофного типа и его водное питание происходит только за счет выпадающих твердых и жидких атмосферных осадков.

Для реализации описанной выше математической модели необходима довольно разнообразная исходная информация, которую можно получить, во-первых, по данным дешифровки аэрофотоснимков (типы микроландшафтов, сетка линий стекания и т. д.), во-вторых, на основе лабораторных и натурных исследований (фильтрационные и адсорбционные свойства почв, геодезическая съемка и т. д.).

Для решения уравнения растекания сточных вод требуется информация о высотных отметках поверхности стояния болотных вод в узлах пространственной сетки. В болотоведении принято полагать, что наклон поверхности болотных вод совпадает с наклоном поверхности болота [2], поэтому для моделирования использовали данные геодезической съемки опытного болотного массива. Далее с помощью ГИС MapInfo по этим данным была создана модель рельефа поверхности болота с пространственным шагом регулярной сетки равным 10 м. Предварительно проведена дешифровка данных аэрофотосъемки болотного массива и построена картосхема гидромеханической сетки линий стекания болотных вод (рис. 1). Особенностью рассматриваемого болотного массива является значительное смещение генетического центра в его западную часть, сложная конфигурация береговой линии, обусловленная рельефом окружающей местности, и наличие двух озер.

Одной из самых важных водно-физических характеристик деятельного слоя болот является его гидравлическая проводимость, которая численно выражается коэффициентом фильтрации K_f (см/с). Гидравличе-

ская проводимость деятельного слоя практически полностью определяет условия и скорость стекания воды с болотных массивов, их водопропускную способность.

Рис. 1. Линии стекания на аэрофотоснимке опытного болотного массива.

Таблица 1. Послойные значения гидрологических и физических свойств торфяной залежи

Слой торфяной залежи от поверхности болота, см	Плотность торфа, г/см ³	Средний коэффициент фильтрации, см/с	Сток с опытного болотного массива, м ³ /ч
0–5	0,014	200	4500
2,5–7,5	0,020	100	2250
5–10	0,025	13,0	320
10–15	0,044	1,8	65
15–20	0,046	0,5	15

Для определения гидравлических характеристик отдельных слоев торфяной залежи опытного болотного массива были использованы лабораторные данные о физических свойствах опытного болота и результаты обобщения стоковых характеристик различных болотных микроландшафтов. В табл. 1 приведены средние значения основных физических и гидроло-

гических свойств для пяти верхних пятисантиметровых слоев торфяной залежи. Величина стока равна максимально возможной пропускной способности соответствующего слоя торфяной залежи для горизонтального потока сточных вод.

Характеристики распространения загрязняющих веществ, поступающих со сточными водами в болото, определяются, с одной стороны, гидрологическими свойствами, с другой – сорбционной способностью торфяной залежи. Для количественного описания сорбционной способности почв, как правило, используется изотерма сорбции. Для опытного болотного массива сорбционная способность, а именно коэффициент распределения K_d , был оценен косвенно как отношение концентрации химического компонента в торфе к его концентрации в болотной воде по данным химического анализа, проведенного в полевых условиях.

Отношение концентраций химических ингредиентов в твердой и жидкой фазах определяется коэффициентом распределения K_d . В табл. 2 приведены оценки коэффициентов распределения для некоторых химических элементов, полученные на основе обобщения гидрохимических и геохимических исследований на опытном болотном массиве.

Полученные данные сопоставлены с результатами работы [4], в которой приведены изотермы сорбции ряда ионов тяжелых металлов. Сравнение показало схожесть полученных двумя методами результатов.

Для расчета распространения загрязняющих веществ по территории болотного массива необходима информация об исходном химическом составе болотных вод и составе сточных вод. Фоновые значения концентраций различных химических компонентов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты распределения химических элементов между твердой и жидкой фазами для торфа опытного болотного массива

Химический элемент	C , мг/л	S , мг/кг	K_d , л/кг
Fe	0,5–2,5	690–6310	1380–2520
Cd	0,0005	1	2000
Cu	0,020–0,035	5,0–9,0	250–260
Cr	0,01	7,0–82,0	700–8200
Hg	0,0001	0,075	750
Mn	0,005–0,4	12–125	300–2400
Pb	0,005	5–14	1000–2800
Zn	0,01–0,02	10,0–19,0	950–1000
Co	0,01	5	500

Алгоритм численной реализации математической модели

Для численной реализации описанной выше математической модели был разработан специальный алгоритм. Дифференциальные уравнения (1, 4) аппроксимировались системой конечно-разностных уравнений, т. к. модель является пространственно-двухмерной использовались схемы расщепления. Последовательность решения уравнений следующая.

Сначала выполняется решение уравнений растекания сточных вод (1). Расчеты проводили до момента относительной стабилизации потоков воды в подповерхностном слое болотного массива. После выполняли численную реализацию уравнения распространения загрязняющих веществ (4). При этом в процессе расчетов использовали значения потоков, полученные при решении уравнения растекания.

Задание краевых и начальных условий, а также некоторых параметров модели проводили с помощью ГИС. В расчетах использовали три информационных слоя: рельеф, микроландшафты и система подачи вод. Слой «рельеф» содержит информацию о высотных отметках поверхности болота в узлах регулярной сетки с шагом 10 м. Слой «микроландшафты» – данные о физических свойствах торфа, фоновых значениях концентрации загрязняющих веществ, уровне грунтовых вод и др. Слой «система подачи вод» содержит информацию (в виде линий) о конфигурации каналов для подачи сточных вод на поверхность болотного массива. Часть информации вводится перед расчетом непосредственно с экрана монитора. На границах расчетной области задаются фоновые характеристики.

Процесс моделирования реализуется в следующей последовательности.

- С экрана монитора вводятся отдельные параметры уравнений растекания грунтовых вод и распространения загрязняющих веществ: размер расчетной области, конфигурация канав для сброса сточных вод и др.
- На экране иницируется условный центр расчетной области.
- Происходит реализация части общей программы, осуществляющей сбор и передачу информации о рельефе, свойствах микроландшафта и др. в головную часть программы.
- Информация о физических свойствах почвы, высотных отметках в узлах расчетного квадрата поступает на вход описанной выше математической модели.
- Выполняется решение уравнений растекания сточных вод и распространения загрязняющих веществ.
- Расчетные характеристики выводятся в виде таблицы, производится визуализация пятна растекания и загрязнения на фотосхеме.

На рис. 2 представлен экран дисплея с окном для ввода информации и аэрофотоснимок опытного болотного массива с расчетным пятном растекания сточных вод.

Рис. 2. Экран дисплея с вводимой и выводимой информацией.

ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД ПРИ СБРОСЕ НА БОЛОТНЫЕ МАССИВЫ

Влияние геометрии сброса сточных вод на их распространение

Одной из важнейших задач, решаемых при сбросе сточных вод, является обоснование и разработка оптимальной технологической схемы сброса на болотный массив с учетом его гидроморфологических особенностей. Если концентрация загрязняющих веществ в сточных водах не превышает ПДК, технология сброса имеет значение только для поддержания на болоте допустимого гидрологического режима. Если же требуется дополнительная очистка сточных вод и для этих целей выбран болотный массив, то технология сброса должна учитывать весь комплекс гидрологических, гидрофизических и сорбционных свойств болота. При этом может быть использован опыт создания поверхностных и подземных полей фильтрации (ППФ) для очистки сточных вод. За рубежом для названия данных территорий используется термин «Constructed Wetland Treatment System» (CWTS) [5].

Подача сточных вод на болотный массив может осуществляться как через точечный выпуск, так и рассредоточенный (разводящая система канав), размещение которых должно быть обосновано индивидуально. В одном или нескольких пунктах в канаву сбрасываются сточные воды, которые равномерно растекаются по ее длине. Далее фильтрационным потоком они распространяются до дренирующего водоприемника.

В данной работе для моделирования фронта сброса сточных вод использована система в виде канав, конфигурация и местоположение которых наносится непосредственно на экране монитора. В качестве подложки используется аэрофотоснимок болотного массива. Уровень болотных вод в канавах задается. В реальных условиях он может быть подвержен естественным колебаниям или специально зарегулирован. Предполагается, что растекание сточных вод происходит в слое, лежащем выше поверхности грунтовых вод, без перемешивания. Каждому уровню болотных вод поставлен в соответствие коэффициент фильтрации (табл. 1).

На рис. 3, 4 показаны области растекания сточных вод по территории болотного массива при различном плановом расположении канав: вблизи генетического центра болотного массива, перпендикулярно и параллельно линиям стекания болотных вод.

Рис. 3. Область распространения сточных вод по территории болотного массива через 200 ч после подачи ($K_f = 100$ см/с): канава расположена вблизи генетического центра болота.

Как следует из полученных результатов, наибольшая площадь растекания наблюдается при размещении канавы для сброса сточных вод вблизи генетического центра болотного массива. В этом случае фильтрационный поток воды распространяется практически по всей территории болотно-

го массива. При размещении канавы перпендикулярно линиям стекания также наблюдается увеличение площади растекания по сравнению с геометрией размещения сточных канав параллельно линиям стекания. Изменяя геометрию канав, можно задействовать различные участки болотного массива в процессе очистки сточных вод (рис. 4).

Рис. 4. Области распространения сточных вод по территории болотного массива при различной конфигурации разводящей системы канав.

В табл. 3 приведены результаты расчета динамики площади распространения сточных вод и средней толщины слоя растекания при перпендикулярном и параллельном относительно линий стока расположении приемной канавы. Как показывают результаты численного моделирования, расположение канавы перпендикулярно линиям стекания приводит к увеличению действующей площади распространения сточных вод и уменьшению слоя растекания по сравнению с вариантом расположения канавы параллельно линиям стока.

Таблица 3. Динамика площади распространения сточных вод (S_p) и толщины слоя растекания (h_p) при интенсивности подачи $500 \text{ м}^3/\text{ч}$, длине канавы 650 м , $K_f = 100 \text{ см/с}$

Канавы расположена перпендикулярно линиям стекания			Канавы расположена параллельно линиям стекания		
$t, \text{ч}$	$S_p, \text{га}$	$h_p, \text{см}$	$t, \text{ч}$	$S_p, \text{га}$	$h_p, \text{см}$
20	25,1	4,1	20	26,4	3,9
40	50,2	4,1	40	47,2	4,3
60	80,9	3,8	60	66,1	4,6
80	106,3	3,8	80	81,9	4,9
100	124,6	4,1	100	89,4	4,4
120	136,7	4,1	120	91,6	3,8
140	139,2	3,4	140	92,3	3,5
160	140,3	2,8	160	92,4	3,6
180	140,8	2,8	180	92,6	3,8
200	140,8	2,9	200	92,9	4,1

Сравнение характеристик распространения сточных вод из канав длиной 650 м и 1400 м показывает, что увеличение длины канавы в $2,15$ раза приводит к увеличению действующей площади болотного массива в $1,43$ раза и уменьшению толщины слоя стекания в $1,6$ раза.

Влияние гидрологических и гидрофизических характеристик на распространение сточных вод

При растекании сточных вод по территории болотного массива основными факторами, определяющими его водопропускную способность и динамику распространения вод, являются уровень болотных вод (УБВ), их уклон и фильтрационные свойства торфяной залежи. Растекание воды происходит рассредоточено по площади болотного массива фильтрационным потоком. Основное количество воды фильтруется в тонком поверхностном горизонте деятельного слоя торфяной залежи.

Для оценки характеристик растекания сточных вод на опытном болотном массиве использованы физические свойства болота в зависимости от уровня болотных вод (табл. 1). Для моделирования были выбраны три слоя торфяной залежи: $0\text{--}5$, $5\text{--}10 \text{ см}$ и промежуточный слой $2,5\text{--}7,5 \text{ см}$ с коэффициентами фильтрации 200 , 13 и 100 см/с соответственно. В табл. 4 приведены результаты расчета динамики площади распространения сточных вод и средней толщины слоя растекания при данных значениях коэффициента фильтрации.

Таблица 4. Динамика площади распространения сточных вод (S_p) и толщины слоя растекания (h_p) при интенсивности подачи $500 \text{ м}^3/\text{ч}$, длине канавы 1400 м

Слой 0–5 см			Слой 2,5–7,5 см			Слой 5–10 см		
$t, \text{ ч}$	$S_p, \text{ га}$	$h_p, \text{ см}$	$t, \text{ ч}$	$S_p, \text{ га}$	$h_p, \text{ см}$	$t, \text{ ч}$	$S_p, \text{ га}$	$h_p, \text{ см}$
10	38,7	1,3	20	47,0	2,1	100	59,4	8,3
20	70,0	1,4	40	84,8	2,3	200	101,9	9,7
30	103,6	1,4	60	123,2	2,4	300	142,6	10,4
40	133,5	1,5	80	156,8	2,5	400	186,7	10,6
50	156,1	1,5	100	179,1	2,5	500	222,6	11,0
60	171,3	1,4	120	194,2	2,6	600	252,2	11,4
70	180,7	1,4	140	201,2	2,5	700	178,5	11,8
80	183,4	1,3	160	203,2	2,4	800	301,2	12,2
90	184,4	1,2	180	204,6	2,4	900	316,0	12,6
100	185,0	1,2	200	205,2	2,4	1000	326,4	12,8

Толщину слоя и площадь растекания на болотном массиве, в основном, определяют интенсивность подачи сточных вод и фильтрационные свойства торфяной залежи. В табл. 5 и 6 приведены результаты моделирования зависимости этих двух характеристик от коэффициента фильтрации и интенсивности сброса.

Таблица 5. Зависимость площади распространения сточных вод (S_p) и толщины слоя растекания (h_p) от коэффициента фильтрации торфяной залежи (K_f) через 100 ч после подачи сточных вод на болотный массив с интенсивностью $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ (длина канавы 650 м)

$K_f, \text{ см/с}$	3,0	8,0	16	30	50	100
$S_p, \text{ га}$	29	39	49	68	90	131
$h_p, \text{ см}$	18	14	11	8,0	6,0	4,0

Таблица 6. Зависимость динамики площади распространения сточных вод (S_p) и толщины слоя растекания (h_p) от интенсивности сброса сточных вод на болотный массив ($Q_{сб}$) через 100 ч после подачи (длина канавы 650 м , коэффициент фильтрации 100 см/с)

$Q_{сб}, \text{ м}^3/\text{ч}$	120	240	500	1000	1500
$S_p, \text{ га}$	117	134	154	182	205
$h_p, \text{ см}$	1,0	1,7	3,0	4,8	6,3

Как показывают результаты моделирования, при низких значениях коэффициента фильтрации, что присуще более глубоким горизонтам торфяника, толщина слоя растекания принимает довольно высокие значения, и растекание сточных вод происходит уже в более близких к поверхности слоях. Зависимость толщины слоя растекания от коэффициента фильтрации носит нелинейный характер (рис. 5). При этом рост коэффициента фильтрации приводит к более интенсивному увеличению площади распространения сточных вод и уменьшению слоя растекания. И наоборот, рост интенсивности сброса сточных вод вызывает увеличение толщины слоя растекания, рост риска выхода сточных вод на поверхность болотного массива и образования областей поверхностного стока, что зачастую нецелесообразно по двум причинам.

Рис. 5. Зависимость слоя растекания сточных вод от коэффициента фильтрации торфяной залежи.

Первая причина связана с тем, что при поверхностном стоке не задействован процесс дополнительной очистки сточных вод. Вторая – с нарушением естественного гидрологического режима болотной экосистемы. В реальности уровень болотных вод в течение года изменяется в значительных пределах и, соответственно, меняются условия сброса сточных вод. В первую очередь – глубина фронта сброса. Соответственно, изменяется естественный ход уровня болотных вод в зависимости от интенсивности сброса, что опосредованно изменяет характеристики других компонентов окружающей среды, в первую очередь, растительности. Если сброс не приводит к изменениям гидрологических характеристик водного объекта, значительно выходящим за пределы естественных сезонных многолетних колебаний, такое воздействие можно охарактеризовать как допустимое. В этом случае функционирование болотной экосистемы является устойчивым. Естественный диапазон изменения уровня болотных вод на раз-

личных болотных микроландшафтах является важным количественным критерием, который следует учитывать при разработке проектов по сбросу сточных вод на болота.

Площадь растекания сточных вод при достижении их водотоков, как правило, стабилизируется (рис. 6).

Влияние адсорбционных и геохимических свойств торфов на распространение загрязняющих веществ

Скорость распространения загрязняющих веществ в болотном массиве зависит от сорбционных свойств торфов и скорости фильтрационного потока сточных вод. При математическом моделировании для численной оценки влияния сорбционных свойств использована такая характеристика, как фактор удерживания R (5). Данная характеристика зависит не только от коэффициента распределения (K_d), но и от плотности торфа (ρ) и его влажности (θ). При полном насыщении объемная влажность торфа близка к 1.

В табл. 7 приведены значения фактора удерживания для торфов сфагново-кустарничково-пушицевого микроландшафта. Данный параметр меняется в широких пределах: чем ниже глубина залегания торфа, тем он выше.

Таблица 7. Фактор удерживания (R) для торфов сфагново-кустарничково-пушицевого болотного микроландшафта, рассчитанный по (5) с учетом (7)

Глубина, см	Плотность торфа, г/см ³	R при $K_d=100$	R при $K_d=500$	R при $K_d=1000$	R при $K_d=2000$
0–5	0,014	2	8	15	29
5–10	0,025	4	14	26	52
10–15	0,044	5	23	46	91
15–20	0,046	6	25	48	95

При фильтрационном потоке через торфяную залежь сточных вод с повышенной концентрацией химических компонентов будет наблюдаться рост концентрации этих компонентов в болотной воде и торфе. При этом из-за поглощения загрязняющих веществ торфом площадь их распространения с фиксированной концентрацией будет гораздо меньше площади, на которой происходит распространение сточных вод. На рис. 7 показано сопоставление ореолов распространения сточных вод и загрязняющего вещества с концентрацией, превышающей фоновую через 200 ч после начала сброса сточных вод на болотный массив. Ареал распространения сточной воды значительно превосходит площадь распространения загрязняющих веществ. При моделировании использованы следующие значения основных параметров: фоновая концентрация загрязняющего вещества в болотной воде – 10 мг/л; концентрация в сточной воде – 100 мг/л; концентрация загрязняющего вещества в расчетном ореоле – 80 мг/л; коэффициент разделения – 500 л/кг; коэффициент фильтрации – 100 см/с; плотность торфа – 0,025 г/см³.

Расчеты показывают, что основное поглощение химических веществ торфом происходит вблизи фронта сброса сточных вод. По мере развития процесса распространения сточных вод по болотному массиву фронт поглощения размывается.

Рис. 7. Площади распространения сточных вод и загрязняющих веществ с концентрацией, превышающей фоновую в два раза, через 200 ч после сброса сточных вод на болотный массив.

Кратность превышения концентрации загрязняющего вещества над фоном при дополнительной очистке сточных вод на болотном массиве в основном зависит от количества пропускаемых через торфяную залежь объемов сточной воды и сорбционных свойств торфа, в нашем случае – величины фактора удерживания (рис. 8).

Еще одним важным параметром болотного массива, на котором планируется дополнительная очистка сточных вод, является время, в течение которого болотный массив сохраняет свою очистительную способность. Рост концентрации загрязняющих веществ в замыкающем створе начинается при достижении ими фронта адсорбции. До этого момента загрязняющие вещества будут поглощаться торфяной залежью. Из законов динамики адсорбции известно, что скорость передвижения фронта адсорбции (U) при очистке сточных вод равна:

$$U = \frac{v}{R}, \quad (8)$$

где v – скорость движения воды через адсорбент (в нашем случае торф).

Скорость движения сточных вод зависит от коэффициента фильтрации торфяной залежи и уклона поверхности болотных вод. Если взять в качестве примера опытный болотный массив, то для наблюдаемых уклонов равных 0,002 можно рассчитать скорости движения сточных вод на различных горизонтах торфяной залежи, а используя величину фактора удерживания – скорость движения фронта адсорбции (табл. 8).

Таблица 8. Послойные параметры очистки сточных вод на болотном массиве

Слой торфяной залежи от поверхности болота, см	0–5	5–10	10–15	15–20
Средний коэффициент фильтрации, см/с	200	13	1,8	0,5
Фактор удерживания	15	26	46	48
Скорость движения сточных вод, м/ч	14,4	0,936	0,1296	0,036
Скорость движения фронта адсорбции, м/ч	0,96	0,036	0,0028	0,0008
Время использования болотного массива, месяц	1,4	38,6	493	1851,9
Пропускная способность слоя торфяной залежи, м ³ /ч	720	47	6	2

Зная расстояние от фронта сброса до зоны приема сточных вод, можно оценить время насыщения торфяной залежи загрязняющим веществом, т. е. время, в течение которого происходит очистка сточных вод. При длине болотного массива 1 км, время использования болотного массива для очистки составляет для верхнего пятисантиметрового слоя торфяной залежи всего полтора месяца, для слоя 5–10 см – три года (табл. 8). Для более глубоких слоев это время измеряется десятками лет. При этом пропускная способность болотного массива нижних горизонтов торфа значительно меньше, чем верхних. В табл. 8 приведены расчеты пропускной способности при длине контура приема сточных вод равной 1000 м.

В реальных условиях движение фронта загрязнения происходит неравномерно, как и распространение болотных вод по болоту. Имеет место высокая неоднородность гидродинамической структуры торфяной залежи с аномально фильтрационными прослойками, с относительно водоупорными прослойками, со слоями различной проницаемости. Поэтому в реальных условиях при сбросе сточных вод на болото концентрация загрязняющих веществ в контрольном замыкающем створе после прохождения их через торфяную залежь будет нарастать постепенно [6].

Результаты математического моделирования довольно точно воспроизводят результаты экспериментальных исследований по прокачке через торфяную колонку растворов различных загрязняющих веществ [7]. Динамика изменения концентрации загрязняющих веществ после прохождения раствора через слой торфа, полученная в экспериментах, практически полностью совпадает с данными расчета по модели (рис. 9).

Рис. 9. Зависимость отношения концентрации меди в поровом растворе (C) к концентрации в пропускаемом через торф растворе (C_0) от количества пропускаемых объемов (nV).

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработана пространственно двухмерная математическая модель с учетом гидрофизических и физико-химических свойств торфяной залежи, позволяющая имитировать процесс сброса сточных вод на болотные массивы при различных технологических вариантах сброса и приема сточных вод. Впервые для моделирования распространения загрязняющих веществ на болоте для ввода исходной информации были использованы ГИС-технологии и разработан специальный информационно-моделирующий комплекс в среде MapInfo.

Модель позволяет подготовить рекомендации по разработке методики использования болот для оптимальной очистки сточных вод и оценки последствий проведения данного водохозяйственного мероприятия. В рекомендациях может быть учтена совокупность основных данных о свойствах болотного массива и предлагаемых технологических подходах по организации сброса и приема сточных вод.

Растекание сточных вод на болоте практически полностью определяется сеткой линий стекания с болотного массива. Водопропускная способность болота зависит от фильтрационных свойств торфяной залежи и геометрии фронта сброса сточных вод. При росте коэффициента фильтрации торфяной залежи на экспериментальном болотном массиве от 0,5 до 200 см/с водопропускная способность болота снижается от 720 до 2 м³/ч.

Чем ниже залегание фронта сброса, тем ниже пропускная способность болота и тем длиннее должен быть канал для сброса сточных вод. Продолжительность очистительных функций болота зависит от сорбционных и гидравлических свойств слагающих болотный массив торфов. Показано, что на экспериментальном болотном массиве рост коэффициента фильтрации торфяной залежи от 0,5 до 200 см/с сокращает продолжительность очистительной способности болота от 5 лет до 1 месяца.

Впервые на реальном болотном массиве были смоделированы в реальном времени различные аспекты процесса сброса сточных вод. Полученные результаты позволяют оценить фактические последствия использования болот в качестве дополнительных очистных сооружений и принимать обоснованные решения о целесообразности проведения данного мероприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водный кодекс Российской Федерации: Пр. 03.06.2006 №74-ФЗ, в редакции, актуальной с 31 октября 2016 г.
2. *Иванов К.Е.* Основы гидрологии болот лесной зоны СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 500 с.
3. *Пачепский Я.А.* Математические модели физико-химических процессов в почвах. М.: Наука. 1990. 186 с.
4. *Ларионов Н.С., Боголицын К.Г., Богданов М.В., Кузнецова И.А.* Характеристика сорбционных свойств верхового торфа по отношению к d- и p-металлам // Химия растительного сырья. 2008. № 4. С. 147–152.
5. *Mays P.A. and Edwards G.S.* Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage. Ecological Engineering. 2001. No 16. P. 487–500.
6. *Носаль А.П.* Оценка самоочищающей способности болот и ее использование при нормировании // Водное хозяйство России. 2002. Т. 4. № 4. С. 308–323.
7. *Ho Y.S., Porter J.F. and McKay G.* Equilibrium isotherm studies for the sorption of divalent metal ions onto peat: Copper, nickel and lead single component systems. Water Air and Soil Pollution, 2002. No 141 (1–4). P. 1–33.

Данные об авторе:

Лавров Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (ГГИ), Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; e-mail: sergey_lavrov_50@mail.ru