

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГООБМЕНА В ПОЧВАХ СИБИРИ

Ю.Б.Кирста

Предложен системно-аналитический метод анализа и моделирования структурно-функциональной организации природных систем. Метод основан на проведении численных экспериментов с использованием больших объемов экспериментальных данных о динамике систем. С его помощью проанализирован режим увлажнения почвы сельскохозяйственной зоны Сибири, выявлен и количественно оценен ряд закономерностей влагообмена в промерзающих и оттаивающих почвах. Разработана математическая модель, характеризующая влагообмен в почвах для всех сезонов года и имеющая адекватность близкую к теоретически наилучшей для этого класса моделей. Для расчета по модели динамики влагозапасов почв необходимы только данные о среднемесячных температурах воздуха и месячных осадках.

ВВЕДЕНИЕ

Данное исследование выполнено на основе эффективного метода анализа структурно-функциональной организации природных систем - системно-аналитического моделирования (САМ) [1]. В отличие от традиционных методов моделирования САМ позволяет выявлять и количественно характеризовать организацию недостаточно изученных систем. При этом используется информация об их функционировании, заключенная неявным образом в многолетних рядах параллельных наблюдений за динамикой их основных процессов и факторов среды. Высокая эффективность САМ подтверждена при моделировании фенологического развития яровой пшеницы, когда были выявлены очень короткие специфические периоды развития, неизвестные ранее [2].

В настоящей работе для агроэкосистем Сибири с помощью САМ построена балансовая модель влагообмена в почвах. Модель описывает динамику запасов продуктивной влаги (выше влажности завядания) в почве под воздействием климатических факторов (температур воздуха и осадков) на протяжении отдельных лет с шагом по времени в 1 месяц. При этом установлен ряд закономерностей влагообмена в различные сезоны года. В частности, охарактеризованы: накопление влаги в верхней толще почвы в начале ее сезонного промерзания за счет создающегося под коркой льда пониженного давления, значительная термодиффузия почвенной влаги снизу вверх зимой и ряд других эффектов.

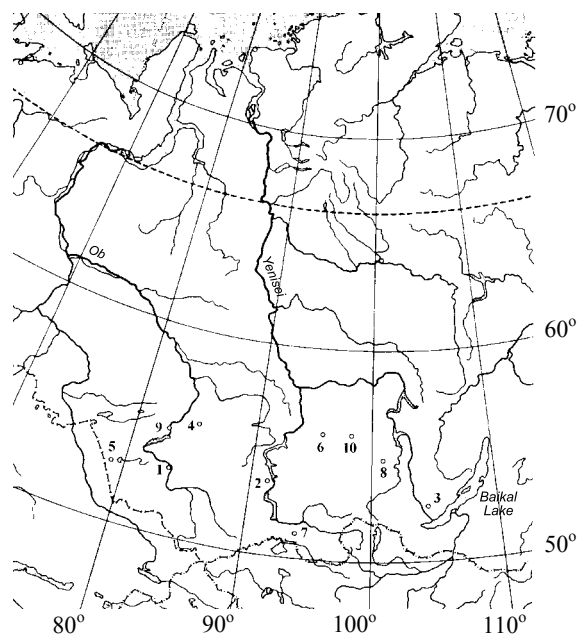


Рис. 1. Расположение агроводнобалансовых станций в сельскохозяйственной зоне Сибири. (1 - Барнаул, 2 - Хакасская, 3 - Хомутово, 4 - Кемерово, 5 - Славгород, 6 - Солянка, 7 - Сосновка, 8 - Тулун, 9 - Огурцово, 10 - Тайшет).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исследованиями охвачена сельскохозяйственная зона Сибири с границами 52 и 56 градусов северной широты, 78 и 104 градуса восточной долготы. В качестве исходных данных для САМ взяты результаты комплексных наблюдений 1972-1985 гг. за динамикой влажности почв в агроэкосистемах с яровой пшеницей. Наблюдения проводились на 10 опорных станциях, входящих в комплексную воднобалансовую и агрометеорологическую сеть Госкомитета СССР по гид-

рометеорологии и контролю природной среды (рис. 1). Сбор данных выполнялся по специальной многолетней научно-исследовательской программе, включающей в себя параллельные наблюдения за развитием основных сельскохозяйственных культур, водным режимом и другими характеристиками сельскохозяйственных полей по стандартным методикам. В ходе САМ в совокупности было использовано более 6 000 месячных характеристик влажности почвы, температур воздуха, осадков и суммарного испарения.

В таблице 1 представлена динамика среднемесячных температур воздуха и месячных осадков для сельскохозяйственной зоны Сибири. Вариации перечисленных ха-

рактеристик во времени и пространстве представлены в таблице через их стандартные (среднеквадратические) отклонения. Последние зависят от изменений климатических условий по территории, погрешности наблюдений и других факторов. Во всех рассмотренных агроэкосистемах орошение не применялось, и глубина залегания грунтовых вод составляла более трех метров. В связи с этим непосредственное влияние грунтовых вод на влагообмен в модели не рассматривалось. Отметим, что характеризуемая территория в целом отличается глубоким залеганием грунтовых вод, поскольку относится к зоне континентального климата средних широт с недостаточным увлажнением [3].

Таблица 1

Климатические характеристики сельскохозяйственной зоны Сибири (все величины рассчитаны из соответствующих месячных характеристик, взятых по 10 станциям (рис. 1) за период 1972-1985 гг.)

Порядковый номер месяца											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемесячные температуры воздуха и их стандартные отклонения, °С											
-19.5	-17.5	-9.2	2.2	9.9	17.2	18.2	15.5	9.8	0.8	-8.2	-16.0
4.8	3.4	2.6	2.8	2.2	2.0	1.7	1.7	1.7	2.4	4.2	4.6
Месячные осадки и их стандартные отклонения, мм											
17.6	13.8	14.3	21.9	33.7	52.0	72.8	55.6	34.1	34.4	25.8	19.2
11.0	9.1	9.4	14.9	17.5	28.2	37.6	28.3	21.3	20.1	14.4	11.0

Таблица 2

Сравнение наблюдаемых и расчетных запасов продуктивной влаги в верхнем метровом слое почв для сельскохозяйственной зоны Сибири (все величины рассчитаны из соответствующих месячных характеристик более 200 полей на 10 станциях (рис. 1) за период 1972-1985 гг.)

Порядковый номер месяца											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Средне многолетние наблюдаемые запасы продуктивной влаги (мм) в верхней метровой толще почв и их стандартные отклонения (А), мм											
142	136	137	143	136	115	81	74	80	98	137	138
45.5	41.9	43.5	53.1	45.7	41.7	40.0	41.8	45.7	48.2	47.1	48.2
Средне многолетние расчетные запасы продуктивной влаги (мм) и их стандартные отклонения от наблюдаемых величин (В) согласно (1), мм											
135	134	139	144	137	111	86	74	76	99	126	136
29.5	21.1	28.6	32.6	26.0	24.0	27.9	27.6	27.8	28.5	30.6	31.4
Отношение стандартных отклонений (В/А), %											
65	50	66	61	57	58	70	66	61	59	65	65

МЕТОД СИСТЕМНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Метод САМ представляет собой специальный анализ динамики природных систем

как целостного комплекса процессов и воздействующих на них факторов среды. Этот комплекс описывается и анализируется в виде математических моделей, которые могут состоять из алгебраических, дифферен-

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГООБМЕНА В ПОЧВАХ СИБИРИ

циальных или иных уравнений. САМ включает применение ряда оптимизационных процедур и численных методов (Монте-Карло, Хука-Дживса [4], Стеффенсона [5] и др.), дающих возможность выявить и количественно оценить взаимодействия процессов и факторов по большому массиву экспериментальных данных об их динамике. Определение взаимодействий производится через целенаправленный подбор и корректировку структуры и уравнений моделей с целью минимизации отклонений (невязки) рассчитываемых динамических характеристик системы от наблюдаемых. При этом проверяется большое число априорных представлений об особенностях взаимодействия процессов и факторов и считается, что наименьшая невязка достигается при наиболее адекватном описании функционирования системы. Подбор вариантов уравнений, описывающих исследуемые процессы и воздействия на них факторов среды, выполняется "вручную" самим исследователем в рамках известных физических, биологических и других законов. В свою очередь, значения параметров в уравнениях подбираются "автоматически" с помощью оптимизационных процедур, посредством которых невязка уменьшается до минимального для проверяемого варианта уровня. Исследование структурно-функциональной организации и построение модели природной системы считаются завершенными при достижении теоретически наилучшей точности описания ее динамики, которая составляет 24% [1, 6].

Для выполнения САМ разработан пакет программ, обеспечивающий одновременный просчет сложной системы уравнений с десятками переменных, обработку больших массивов экспериментальных данных (тысячи единиц хранения) и оптимизационный подбор до 100 параметров уравнений. Подбор параметров осуществляется путем вариации их значений с постепенно уменьшающимся шагом и достижением наилучшего для проверяемого варианта уравнений значения невязки. Выполняемое таким образом уточнение значений параметров, очевидно, объединяет в себе и процедуру идентификации (определения параметров), и процедуру верификации (проверки) модели сразу по всей совокупности экспериментальных данных об изучаемой системе.

В ходе САМ каждая функциональная зависимость подвергалась двум проверкам: на соответствие известным физическим законам и закономерностям, и на соответствие рас-

считываемых значений параметров экспериментальным (литературным) данным. С этой целью во всех расчетах ни на форму проверяемых функциональных зависимостей, ни на значения параметров не накладывалось искусственных ограничений. Тем самым, метод САМ является по сути имитационным, то есть имитирующим организацию и закономерности процессов в реальных природных системах.

В данной работе ставилась задача выявления с помощью САМ основных закономерностей и разработки модели влагообмена в почвах, типичных для агроэкосистем Сибири. При этом задача была осложнена наличием значительных вариаций климатических факторов и экологических условий в пределах характеризуемой территории (рис. 1). Для оптимизационного подбора параметров была выбрана стандартная невязка между расчетными и наблюдаемыми величинами:

$$\text{Невязка} = \sum_{l=1}^{10} \sum_{k=1}^{k1} \sum_{j=1972}^{1985} \sum_{i=1}^{12} \frac{(W_{lkji}^{cal} - W_{lkji}^{obs})^2}{N}, \quad (1)$$

где i - месяц года; j - год; k - порядковый номер агроценоза пшеницы; l - номер станции (рис. 1); kl - число наблюдаемых агроценозов на станции l ; W_{lkji}^{cal} , W_{lkji}^{obs} - соответственно расчетные и наблюдаемые значения запасов продуктивной влаги в верхнем метровом слое почвы; N - общее число наблюдений за почвенной влагой (более 2000).

Любая математическая модель должна характеризовать основные, наиболее важные для исследуемых систем процессы и влияющие на них факторы. Поэтому в процессе исследований из модели исключались все выявляемые, но малозначимые функциональные зависимости. Последние не учитывались в модели, если давали уменьшение невязки (1) менее 1%. Это позволило избежать излишнего усложнения модели и уменьшить в ходе исследований число ее параметров с 40-50 (для различных вариантов уравнений модели) до 36. В целом было просчитано и проанализировано более 1000 различных вариантов описания процессов влагообмена в почвах. Оказалось, что все значимые в указанном выше смысле функциональные зависимости имели достаточно простую форму. Усложнение формы этих зависимостей и введение для них дополнительных параметров в подавляющем числе случаев улучшало невязку (1) не более чем на 1%. Основываясь на этом, можно полагать, что в универсальных моделях влагооб-

мена для территорий со значительными вариациями условий среды следует характеризовать динамику процессов влагообмена через достаточно простые зависимости от факторов среды. Кроме того, такие модели не требуют полевых измерений многих специфических характеристик почв, рельефа, атмосферных условий, что значительно облегчает их практическое применение. И наконец, метод САМ позволяет ограничиться лишь небольшим числом основных характеристик среды - в нашем случае лишь данными по влажности почвы, температурам воздуха и осадкам.

Значительное превышение числа данных наблюдений в (1) над числом параметров (более 2000 данных по влажности почвы против 36 параметров в описании влагообмена) позволило охарактеризовать процессы и определить значения параметров более точно, чем это могло бы быть сделано при специальных полевых наблюдениях. Такое превышение определило высокую чувствительность метода САМ как инструмента исследования влагообмена. Так, с помощью САМ легко проверялись "на реальность" предполагаемые закономерности влагообмена, в том числе с относительно малым вкладом во влагообмен или трудно определяемые экспериментально.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГООБМЕНА

Для описания влагообмена в почвах использовалась система балансовых уравнений вида

$$W^{II} - W^I = \sum_{i=1}^n PRO_i(P, T, W, Par_1, \dots, Par_k) \quad (2)$$

где W^I , W^{II} – запасы продуктивной влаги в верхнем метровом слое почвы на начало и конец текущего месяца соответственно, мм; PRO_i – изменение запасов влаги за счет процесса i , зависящего от аргументов P , T , W и параметров, мм за месяц; n – общее число процессов, рассматриваемых в текущем сезоне года; P – месячные осадки, мм; T – среднемесячная температура воздуха, °C; W – среднемесячные запасы продуктивной влаги $W=(W^I+W^{II})/2$, мм; Par_1, \dots, Par_k – параметры модели, общее число которых равно k .

Для описания отдельных зависимостей в ряде случаев использовалась функция

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) = \begin{cases} Y1 - Z1(X - X1), & \text{если } X < X1 \\ \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}(X - X1) + Y1, & \text{если } X1 \leq X < X2, \\ Y2 + Z2(X - X2), & \text{если } X \geq X2 \end{cases} \quad (3)$$

где $X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2$ – параметры; X – переменная. Легко видеть, что непрерывная кусочно-линейная функция H может использоваться для описания (аппроксимации) различных форм зависимостей между переменными.

Рассчитываемые по (2) для отдельных агроэкосистем и лет среднемесячные запасы влаги подставлялись в (1) для определения значений параметров модели и невязки путем указанных выше оптимизационных процедур. В ходе САМ проверялись различные варианты правой части уравнения (2), отражающие разные зависимости процессов влагообмена друг от друга и метеорологических условий текущего и предшествующего года. В результате была найдена модель влагообмена, включающая более двух десятков уравнений и дающая минимальную из всех вариантов невязку (1).

Для описания влагообмена в почвах был выбран верхний метровый слой почвы, поскольку этот слой активно обменивается влагой с атмосферой через растения и поверхность почвы [7]. Кроме того, данный слой близко соответствует корнеобитаемой зоне однолетних растений. В свою очередь, характерное время изменения запасов влаги этого слоя, как в летний, так и зимний периоды года составляет порядка 1 месяца [7, 8]. Это обусловило выбор шага описания влагообмена равным 1 месяцу и позволило ограничиться в САМ лишь месячными значениями температур воздуха, осадков и влажности почвы. В целом, при описании балансов продуктивной влаги учитывались уже накопленная в почве влага, месячные осадки, обмен влагой с нижележащей толщей почвы, транспирация растений и испарение с поверхности почвы, поверхностный и боковой внутрипочвенный сток и ряд других процессов.

САМ показало, что влагообмен текущего года в значительной степени зависит от метеорологических условий предшествующего года. В связи с этим, расчет среднемесячных значений влажности почв в модели выполняется последовательно с января предшествующего до декабря текущего года и осуществляется единообразно для обоих лет. В

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГООБМЕНА В ПОЧВАХ СИБИРИ

свою очередь, невязка (1) рассчитывается только для текущего года. При этом запасы влаги на начало января предшествующего года являются параметром модели и равны 137 мм. Как и должно быть при адекватной модели, это значение совпадает с экспериментальными данными по запасам влаги для зимнего периода (табл. 2). Следует подчеркнуть, что найденные в процессе САМ значения параметров являются одинаковыми для сельскохозяйственной зоны Сибири.

Текущий и предшествующий годы разделены в модели традиционным образом на 4 периода (зимний, весенний, летний и осенний), каждому из которых отвечают свои уравнения влагообмена. Согласно результатам САМ, весенний период начинается, когда среднемесячная температура воздуха становится выше порогового значения 1.1°C , и длится 1 календарный месяц. В это время происходит оттаивание почв. Затем следует продолжительный летний период. Осенний период начинается при среднемесячных температурах воздуха ниже -3.6°C и длится подобно весеннему 1 календарный месяц. Здесь начинается сезонное промерзание почв. Затем следуют зимние месяцы с дальнейшим промерзанием верхней толщи почвы.

Рассмотрим основные сезонные закономерности влагообмена, отражаемые в модели. В нашем случае целесообразно начать с осеннего периода, поскольку климатические условия осени предшествующего года в значительной степени влияют на влагообмен зимой и весной текущего года.

Осенний период. В осеннем периоде начинается сезонное промерзание почв. САМ показало, что осенний баланс влаги (2) в целом определяется следующими процессами:

$$PRO_1 = \begin{cases} P, & \text{если } T \geq -5.4^{\circ}\text{C} \\ 0, & \text{если } T < -5.4^{\circ}\text{C}, \end{cases}$$

$$PRO_2 = \begin{cases} -0.17 \times W, & \text{если } W < 95.5 \text{ мм} \\ 0, & \text{если } W \geq 95.5 \text{ мм} \end{cases},$$

$$PRO_3 = \begin{cases} 0, & \text{если } W < 95.5 \text{ мм} \\ 39.4, & \text{если } W \geq 95.5 \text{ мм} \end{cases},$$

где PRO_1 – инфильтрация осадков в почву; PRO_2 – конвекция парообразной влаги сквозь поровое пространство почвы в атмосферу; PRO_3 – диффузия парообразной влаги из глубоких почвенных горизонтов в верхний метровый слой, где она конденсируется.

1-й процесс PRO_1 идет вне зависимости от влажности почвы W и отвечает поступлению 100% осадков P в почву при температуре

воздуха $T \geq -5.4^{\circ}\text{C}$. При $T < -5.4^{\circ}\text{C}$ осадки остаются на поверхности почвы в виде снега, и их поступление в почву равно нулю. 2-й процесс PRO_2 отвечает выносу влаги с теплым воздухом из почвы в более холодный атмосферный воздух со скоростью $0.17 \times W$ мм/месяц. Условием существования такой конвекции сквозь поровое пространство почвы является требование $W < 95.5$ мм. Отметим, что конвекция должна идти в основном ночью, когда перепад между температурой атмосферного воздуха и температурой почвы максимален. 3-й процесс PRO_3 подобен конденсации водяного пара на внутренней стороне крышки остывающей кастрюли. В почве роль «крышки» играет непроницаемый ледяной слой, образующийся в приповерхностном слое почвы при $W \geq 95.5$ мм по мере осенне-зимнего понижения температуры воздуха. Экспериментальным подтверждением формирования такого слоя льда может служить, например, появление вакуумного разрежения внутри почвы [9]. Интенсивность 3-го процесса (подтягивания влаги снизу) достигает 39.4 мм/месяц.

Зимний период. По данным наблюдений промерзание почв в агроэкосистемах Сибири обычно достигает глубины более 100 см. Известно, что миграция влаги в почвах при их промерзании и оттаивании определяется большим числом различных физических процессов [8, 10, 11]. В ходе САМ установлено, что зимний влагообмен определяется в основном процессами термодиффузии (передвижением влаги в парообразном виде), зависящими от W и T :

$$PRO_1 = \begin{cases} H(-40.0, -10.7, -31.6, 11.0, 0, 0, T), & \text{если } W < 139.6 \text{ мм} \\ H(-10.7, -10.7, -4.4, 7.8, 0, 0, T), & \text{если } W \geq 139.6 \text{ мм} \end{cases}$$

где PRO_1 – термодиффузия водяного пара; H – функция (3).

В случае $W < 139.6$ мм (рис. 2, зависимость а) поровое пространство почвы достаточно свободно, и при $T < -10.7^{\circ}\text{C}$ начинается заметная термодиффузия влаги из почвы в более холодный снежный покров (атмосферу). Эти потери влаги, очевидно, тем больше, чем значительнее разница температур почвы и атмосферы. При $W \geq 139.6$ мм (рис. 2, зависимость б) термодиффузия невелика из-за перекрытия порового пространства льдом и идет при $T < -10.7^{\circ}\text{C}$ лишь из приповерхностного слоя почвы в снежный покров. При $T > -10.7^{\circ}\text{C}$ поступление влаги снизу в рассматриваемый метровый слой превышает ее по-

тери в снежный покров, которые малы или отсутствуют из-за незначительной разницы температур почвы и атмосферы.



Рис. 2. Температурная зависимость термодиффузии влаги (>0 - приток, <0 - потери) из верхнего метрового слоя почвы в зимний период года при среднемесячных запасах продуктивной влаги этого слоя $W < 139.6$ мм (а) и $W \geq 139.6$ мм (б).

Весенний период. В весенний период идет оттаивание почв, обычно заканчивающееся в начале летнего периода. Скорость оттаивания почв сверху по данным наблюдений достигает 100 см/месяц и, как правило, превышает скорость их оттаивания снизу. Оттаиванию почвы предшествует стаивание снега. При этом талые воды плохо проникают в промерзшую почву и формируют лишь поверхностный и внутрипочвенный боковой сток. Согласно результатам САМ, баланс влаги в весеннем периоде определяется следующими основными процессами:

$$PRO_1 = P,$$

$$PRO_2 = -5.13 \times T,$$

$$PRO_3 = \begin{cases} 0, & \text{если } W < 117.4 \text{ мм} \\ -16.5, & \text{если } W \geq 117.4 \text{ мм}, \end{cases}$$

$$PRO_4 = \begin{cases} 0, & \text{если } W < 149.1 \text{ мм} \\ 1.92 \times P, & \text{если } W \geq 149.1 \text{ мм}, \end{cases}$$

$$PRO_5 = \begin{cases} 0.36 \times W, & \text{если } 117.4 \leq W < 139.6 \text{ мм} \\ 0 & \text{если } 4.3 \leq T < 12.1 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0 & \text{во всех других случаях,} \end{cases}$$

$$PRO_6 = \begin{cases} 0, & \text{если } W'' \leq 192.9 \text{ мм} \\ -(W'' - 192.9), & \text{если } W'' > 192.9 \text{ мм,} \end{cases}$$

где PRO_1 – инфильтрация осадков в почву; PRO_2 – эвапотранспирация; PRO_3 – переме-

щение влаги в более глубокие почвенные горизонты; PRO_4 – восходящий поток парообразной влаги из нижних горизонтов и ее конденсация в верхнем метровом слое почвы при ночных понижениях температуры воздуха; PRO_5 – формирование временного «подвешенного» горизонта влаги; PRO_6 – инфильтрация гравитационной влаги вниз при насыщении влагой верхнего слоя почвы; W'' – содержание продуктивной влаги на конец месяца согласно (2) $W'' - W' = \sum_{i=1}^6 PRO_i$.

1-й процесс PRO_1 отвечает поступлению в почву 100% осадков, что объясняется стаиванием снежного покрова к началу весеннего периода и тем, что оттаивание и промачивание почв осадками идут одновременно. Интенсивность 2-го процесса PRO_2 , характеризующего расход влаги на эвапотранспирацию, прямо пропорциональна температуре воздуха и равна $5.13 \times T$ мм/месяц. 3-й процесс PRO_3 идет при условии $W \geq 117.4$ мм с интенсивностью оттока влаги 16.5 мм/месяц. Существование этого процесса может объясняться движением капиллярной влаги сверху вниз при оттаивании почвы, внутрисочвенным боковым стоком и другими причинами [8].

4-й процесс PRO_4 идет при условии $W > 149.1$ мм с интенсивностью $1.92 \times P$ мм/месяц. Здесь интересна полученная прямо пропорциональная зависимость процесса от количества осадков P . Она может объясняться формированием из влаги осадков сплошной ледяной корки в приповерхностном слое почвы при ночных понижениях температуры воздуха. Ранней весной часто видно подобную корку, образующуюся на поверхности луж. В результате под коркой идет конденсация водяного пара, которая в отличие от осеннего периода существует только в ночные часы. Поэтому, чем больше количество осадков, тем чаще формируется ледяная корка, и тем больше насыщается влагой верхний почвенный слой.

5-й процесс PRO_5 отражает формирование временного термодиффузионного горизонта влаги, называемого также «подвешенным» горизонтом. Существование такого горизонта предполагается многими исследователями, но его экспериментальное подтверждение и тем более измерение его количественных характеристик достаточно затруднено. Последнее обусловлено сложностью отделения собственно термодиффузионной влаги от остальной присутствующей в почве влаги. В отличие от традиционных экспери-

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГООБМЕНА В ПОЧВАХ СИБИРИ

ментальных методов, САМ позволяет разделить и количественно охарактеризовать каждый из основных процессов влагообмена в почве. С помощью САМ определены следующие условия существования временного термодиффузионного горизонта влаги (рис. 3): $117.4 < W < 139.6$ мм и $4.3 < T < 12.1$ °С. Выяснилось, что мощность этого горизонта прямо пропорциональна влажности почвы и равна $0.36 \times W$ мм.

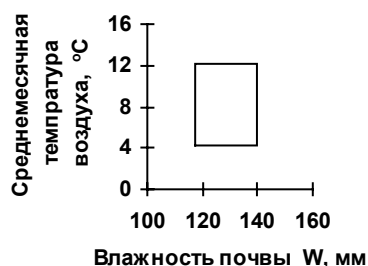


Рис. 3. Область формирования временного "подвешенного" термодиффузионного горизонта влаги весной.

Последний 6-й процесс PRO_6 имеет место в случае насыщения почвы влагой выше полевой влагоемкости, когда избыточная (гравитационная) влага стекает в нижележащие слои почвы. Этот процесс учтен в модели как ограничение влажности W максимальным значением 192.9 мм.

Летний период. Изучению влагообмена в свободных ото льда почвах посвящено много теоретических и экспериментальных исследований (например, [12, 13]). В связи с достаточно хорошей изученностью процессов влагообмена в летнем периоде, выполнение САМ здесь вызвало наименьшие трудности. С помощью САМ выделены и количественно охарактеризованы следующие основные процессы, определяющие летний баланс влаги:

$$PRO_1 = 0.77 \times P,$$

$$PRO_2 = \begin{cases} -5.13 \times T, & \text{если } T > 0^\circ\text{C} \\ -a, & \text{если } 5.13 \times T > a \\ 0, & \text{если } T \leq 0^\circ\text{C}, \end{cases}$$

$$PRO_3 = H(64.1, 300.0, 31.9, -67.7, 0, 0, W),$$

где PRO_1 — инфильтрация осадков в почву; PRO_2 — эвапотранспирация; PRO_3 — диффузия влаги через нижнюю границу верхнего метрового слоя почвы; a — эвапотранспира-

ция, рассчитываемая согласно (2) из уравнения $22.6 - W^l = PRO_1 - a + PRO_3$.

1-й процесс PRO_1 отвечает поступлению в почву только 77% выпадающих осадков в связи с частичным перехватом осадков растениями. 2-й процесс PRO_2 является важным для формирования урожая. Исследование процесса в рамках САМ выполнялось сначала с привлечением данных наблюдений за эвапотранспирацией, полученных с помощью стандартных почвенных испарителей ГГИ-500. В ходе исследований выяснилось, что данные этих испарителей неадекватно характеризуют реальную эвапотранспирацию из-за самой конструкции приборов — отсутствия у них влагообмена с нижележащими слоями почвы. В связи с этим все данные наблюдений за эвапотранспирацией в дальнейшем были исключены из исследований. САМ показало, что интенсивность эвапотранспирации, подобно весеннему периоду, равна $5.13 \times T$ мм/месяц и становится нулевой при $T \leq 0^\circ\text{C}$. В случае летнего иссушения верхнего метрового слоя почвы интенсивность эвапотранспирации ограничена величиной, обеспечивающей минимально возможные запасы влаги в этом слое $W = 22.6$ мм.

Интенсивность 3-го процесса PRO_3 характеризуется зависимостью от влажности почвы W , представленной на рис. 4. Согласно последнему, при больших значениях W , наблюдающихся обычно в начале лета, влага диффундирует из рассматриваемого метрового слоя в более глубокие слои почвы. По мере снижения влажности W диффузия меняет свое направление и идет снизу вверх. При этом интенсивность диффузии снизу-вверх ограничена значением 31.9 мм/месяц.

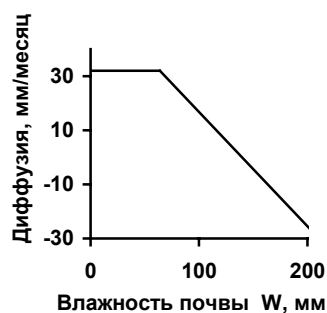


Рис. 4. Диффузия влаги (>0 — приток, <0 — потери) через нижнюю границу верхнего метрового слоя почвы в летний период года.

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ВЛАГООБМЕНА

В результате САМ выявлены основные процессы, формирующие влагообмен в почвах сельскохозяйственной зоны Сибири и составляющие основу разработанной модели влагообмена. При одинаковых для рассматриваемой территории значениях параметров модель позволяет рассчитывать запасы продуктивной влаги для различных почв исключительно по данным о месячных осадках и температурах воздуха без экспериментального определения каких-либо характеристик почв. Стандартное отклонение расчетных значений от наблюдаемых в среднем по 12 месяцам года при этом равно 28 мм (табл. 2). При нормировании этого отклонения на среднегодовые запасы влаги 116 мм мы получаем точность (коэффициент вариации), равную $28/116 \times 100 \approx 24\%$. Эта точность описания влагообмена складывается из погрешности данных наблюдений, разброса биологических и почвенно-климатических характеристик агроэкосистем, а также погрешности расчетов по самой модели. В то же время, из информационных принципов функционирования природных систем известно, что допустимый разброс их характеристик имеет стандартное отклонение 24% [6, 14]. Отсюда следует, что полученная точность (стандартное отклонение) описания влагообмена 24% практически полностью формируется за счет разброса почвенно-климатических характеристик агроэкосистем. Погрешность же данных наблюдений и погрешность самой модели здесь относительно малы. Иными словами, адекватность разработанной модели приближается к «идеальной».

Следует отметить, что при расчете динамики влажности отдельных конкретных почв стандартное отклонение расчетных данных от фактических может быть значительно меньше 24%. Это обусловлено отсутствием вариаций почвенных характеристик, а значит, и отсутствием их вклада в общую погрешность расчетов по модели.

При оценке адекватности описания влагообмена в разные сезоны года можно также воспользоваться следующим методом. Очевидно, что элементарной моделью для расчета помесечной динамики влажности почв являются непосредственно 12 значений среднемноголетних наблюдаемых запасов продуктивной влаги (табл. 2). Элементарная модель характеризуется 12 месячными стан-

дартными отклонениями, равными соответствующим 12 стандартным отклонениям наблюдаемых данных. Тогда уровень адекватности других моделей можно оценить через соотношение их месячных стандартных отклонений расчетов к соответствующим отклонениям у элементарной модели. Как видно из табл. 2, это отношение для разработанной модели составляет в среднем 62%. Равномерность улучшения отклонений (по сравнению с элементарной моделью) для всех месяцев также позволяет сделать вывод об адекватном учете всех основных процессов, определяющих влагообмен в почвах в различные сезоны года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод САМ представляет собой эффективный инструмент анализа структурно-функциональной организации природных систем и хорошо дополняет экспериментальные методы исследований. САМ позволяет выявлять и количественно оценивать закономерности функционирования сложных систем, изучение которых экспериментально затруднительно. При этом не требуется специализированных трудоемких исследований изучаемой системы и достаточно лишь наблюдений за изменениями ее отдельных характеристик. В данном исследовании для анализа закономерностей влагообмена в почвах потребовались только наблюдения за влажностью почв, температурой воздуха и осадками.

Важной особенностью САМ является независимость анализа от погрешности используемых экспериментальных данных. С ростом погрешности данных, очевидно, увеличивается значение невязки (1), но практически не меняется количественная оценка параметров исследуемых процессов при выполнении оптимизационных процедур САМ.

Наряду с преимуществами перед традиционными методами математического моделирования САМ имеет и недостатки. Основной - это необходимость в большом количестве экспериментальных данных о динамике исследуемой системы. Можно полагать, что при современной автоматизации наблюдений этот недостаток не будет столь значимым. Другой недостаток - это трудоемкость САМ, которое требует анализа и проверки значительного количества вариантов уравнений, описывающих исследуемую систему.

Проведенные на основе САМ многолетние исследования влагообмена в почвах Си-

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГООБМЕНА В ПОЧВАХ СИБИРИ

бири выявили ряд важных процессов и закономерностей этого влагообмена. Установлены и количественно охарактеризованы: подъем влаги из глубоких почвенных горизонтов к поверхности при образовании на ней ледяной корки поздней осенью и весеннем периодах, термодиффузия влаги из почвы в снежный покров зимой, условия формирования временного ("подвешенного") термодиффузионного горизонта влаги весной и ряд других процессов.

С помощью САМ разработана математическая модель, описывающая влагообмен в промерзающих и оттаивающих почвах с высокой степенью адекватности. Рассмотренная зона Сибири отличается значительными вариациями климатических условий, в частности, среднемесячные температуры воздуха меняются от -32°C зимой до $+22^{\circ}\text{C}$ летом. Это дает возможность применять модель для других зон с отрицательными зимними температурами воздуха после идентификации ее параметров в рамках САМ.

Работа поддержана грантами Министерства образования РФ (УР 08.01.017) и РФФИ (02-05-81013 Бел 2002а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирста Ю.Б. Разработка методов моделирования и прогноза урожайности агроценозов как основы мониторинга агроэкосистем // Экологический анализ региона (теория, методы, практика): Сб. науч. тр. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. - С.47-60.
2. Kirsta Yu.B., Tarabrin V.A. Real biological time and its calculation in wheat // Ecological Modelling, 1994, v.71, - p. 259-267.
3. Мосиенко Н.А. Агрогидрологические основы орошения (на примере Западной Сибири, Урала и Северного Казахстана). - Л., Гидрометеиздат, 1984. - 215 с.
4. Hooke R., Jeeves T.A. Direct search solution of numerical and statistical problems // J. Assn. Comp. Mach., 1961, v.8, - p. 212-229.
5. Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. - М., Мир, 1975. - 558 с.
6. Kirsta Yu.B. Exchange of information in natural hierarchical systems // Ecological. Modelling, 1994, v.73, - p. 269-280.
7. Зубенок Л.И. Испарение с континентов, Л., Гидрометеиздат. - 1976. - 263 с.
8. Палагин Э.Г. Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур. - Л., Гидрометеиздат, 1981. - 191 с.
9. Горяев В.Е. Гидродинамические режимы сезонной миграции почвенной влаги в степной Кулунде // "Гидрогеолого-мелиоративные исследования в Западной Сибири". Сб. ст. Сиб. НИИ гидротехники и мелиорации. Красноярск, 1986. - С. 12-26.
10. Муромцев Н.А. Расход влаги из зоны аэрации и грунтовых вод к фронту промерзания почв по данным лизиметрических исследований // Почвоведение, 1986, N 12. - С 59-68.
11. Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. - Новосибирск, Наука, 1988. - 258 с.
12. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге, Т. 1, Водные свойства почв и передвижение почвенной влаги. - Л., Гидрометеиздат, 1965. - 213 с.
13. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге, Т. 2, Методы изучения водного режима почв. - Л., Гидрометеиздат, 1969. - 287 с.
14. Kirsta Yu.B. Information-hierarchical organization of biosphere and problems of its sustainable development // Ecological Modelling, 2001, v.145, - p. 49-59.