

РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ РУСЛОВОЙ ГИДРАВЛИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

А.В. Романов¹, П.В. Скрибцов², М.А. Червоненкис²

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

²ООО «Павлин Технологии», г. Дубна, Московская обл.

alexey.romanov@mecom.ru, skribtsov@pawlin.ru, chervonenkis@yandex.ru

Общая характеристика проблемы

Современное развитие методов математического моделирования процессов гидрологического цикла включает в себя неформальное объединение простейших гидрологических и сложных гидродинамических (гидравлических) моделей. Этот процесс будет происходить на базе использования старых и новых языков программирования высокого уровня, новых методов математической обработки информации с использованием стандартной системы гидрометеорологических наблюдений, ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования с высокой степенью разрешения. В той или иной степени эта концепция уже реализуется (в частности в США) в рамках комплексной системы прогнозирования водного режима больших речных систем с использованием моделей с сосредоточенными (HEC-HMS, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>) и распределёнными (HEC-RAS, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>; HL-RDHM, <http://www.nws.noaa.gov/oh/hr/distmodel/distmod.htm#hlrms>) параметрами. При этом базовой моделью русловой трансформации практически всегда является одномерная модель неустановившегося движения воды в русле (система уравнений Сен-Венана), которая в наиболее общей постановке записывается следующим образом [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(F + F_0)}{\partial t} &= q, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{Q^2}{F}\right)}{\partial x} + gF\left(\frac{\partial H}{\partial x} + S_f\right) - qv_x + W_f B &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

причём

$$S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{F^2 R^{4/3}},$$

$$W_f = C_w |V_w \cos \omega| V_w \cos \omega,$$

где x – расстояние по осевой линии потока; t – время; Q – расход воды; F – активная площадь живого сечения; F_0 – пассивная площадь или площадь мёртвой зоны в поперечном сечении; q – боковой приток (отток) воды; H – уровень воды; v_x – скорость бокового притока в x – направлении; B – ширина верхней части активной площади поперечного сечения; g – ускорение силы тяжести; S_f – угол трения; n – коэффициент шероховатости в формуле Шези-Маннинга; R – гидравлический радиус; W_f – ветровой эффект; C_w – ветровой коэффициент; V_w – скорость ветра относительно скорости течения воды; ω – угол между направлением ветра и X – осью реки.

Если немного изменить инерционную часть уравнения движения (1) и пренебречь влиянием ветра и инерцией бокового притока, то можно получить более простую систему дифференциальных уравнений гиперболического типа, которая реально используется в различных модификациях для расчётов и прогнозов стока:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{F} \right)}{\partial x} + F \frac{Q|Q|}{K^2} + F \frac{\partial H}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = q, \quad (3)$$

где K – пропускная способность русла (модуль расхода воды), которая может быть записана в виде

$$K = \frac{FR^{2/3}}{n}.$$

В ряде случаев уравнение движения (2) удобнее представить в следующем виде

$$\frac{1}{g} \frac{\partial \left(\frac{Q}{F} \right)}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{F^2} \right)}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} + \frac{\partial H}{\partial x} + q \frac{Q}{gF^2} = 0. \quad (4)$$

Существует большой спектр задач, в которых рассматривается кинематическая и диффузионная модификации модели неустановившегося движения воды, выраженная уравнениями (2)/(4), (3). В случае кинематической модели уравнения (2)/(4), (3) трансформируются к виду

$$S_0 = \frac{Q|Q|}{K^2},$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = q,$$

где S_0 – уклон дна реки. Соответственно, диффузионная аппроксимация имеет вид:

$$-\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{Q|Q|}{K^2},$$
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = q.$$

Часто встречается и другая запись диффузионной модели, в которой явно используются уклон дна (S_0) и средняя глубина русла реки h :

$$S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{Q|Q|}{K^2},$$
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = q.$$

Анализ диффузионной и кинематической моделей движения воды показывает, что в первом случае не учитываются члены, выражающие изменения, связанные с временной изменчивостью притока и пространственной изменчивостью скорости потока. В случае кинематической аппроксимации фактически рассматривается уравнение инерции как результат сил гравитации и трения.

Принципиальным вопросом использования данной модели в той или иной аппроксимации является задание основных характеристик речного русла (B , F , n или K). В настоящее время в теории и практике задания этих функций фактически существуют два направления.

Первое направление, связанное с решением обратных задач для уравнений (2)/(4), (3), получило определённое развитие в основном в нашей стране [1, 4, 5]. В определённой степени это было связано, во-первых, с ограниченными финансовыми возможностями по проведению детальных измерений характеристик речного русла, а во-вторых, с отсутствием (во всяком случае в системе гидрометеорологической службы СССР, а позднее Российской Федерации) необходимых инструментальных средств, обеспечивающих GPS-привязку выполненных измерений. Фактически это ограничение, а также определённая условность одномерной схематизации движения воды в случае сложного по строению пойменного речного русла, привело к стремлению получить все необходимые характеристики используя только данные о водном режиме (уровни и расходы воды) и отметках линии дна по длине расчётного участка.

Второе направление, в рамках которого все необходимые характеристики (в первую очередь морфометрия русла) детально измеряются по длине расчётного участка с GPS-привязкой измерений и последующей их ГИС-обработкой и активно развиваются, в первую

очередь, в системе Инженерного корпуса армии США (<http://www.hec.usace.army.mil/>) и в последнее время – в Национальной службе погоды (<http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/hsmb/hydraulics/index.html>). Однако в рамках данного направления выполнить измерение всех необходимых характеристик также полностью невозможно, поэтому в любом случае опыт, накопленный в рамках реализации различных подходов, в рамках первого направления может существенно улучшить систему калибровки модели в рамках второго направления. В частности, гидравлические характеристики речного русла (n или K) обычно подбираются эмпирически. В США для эмпирического подбора коэффициента шероховатости в формуле Шези-Маннинга (n) используется электронная база данных этой характеристики, доступная любому пользователю сети Internet (<http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/index.htm>). Фактически имея визуальное представление о характере формирования водного режима реки, для которой нужно определить эту характеристику, пользователь сопоставляет его с фотографиями и описаниями реперных участков рек, размещённых в указанной базе данных, и подбирает постоянное значение, которое удовлетворяет его расчётной и прогностической схеме.

Очевидно, что любое экономическое сопоставление этих двух направлений практически всегда будет в пользу первого из них, так как финансовые затраты на проведение детальных измерений морфометрических характеристик русла по длине расчётных участков, насчитывающих несколько сот километров, на несколько порядков превышают аналогичные затраты на формирование электронной базы данных по уровням и расходам воды, определяющей возможности реализации алгоритмов решения обратных задач для системы уравнений (2)/(4), (3).

Технологии усвоения стандартных данных наблюдений за водным режимом

Основная идея данной работы состоит в обсуждении математических и технологических проблем, связанных с косвенным (решение обратных задач) определением двумерных функций (морфометрических и гидравлических), определяющих возможности построения численной схемы расчёта (прогноза) уровней и расходов воды по длине расчётных участков отдельно взятой речной системы при любых условиях регулирования стока. Практически все опубликованные работы, связанные с использованием системы уравнений (2)/(4), (3) для расчётов и прогнозов паводков и половодья, обходят детальное обсуждение вопросов задания двумерных функций, описывающих морфометрию и гидравлику русла. В подавляющем большинстве случаев – это делается сознательно, так как

окончательно используемые функции, во-первых, существенно отличаются от реально измеренных, а, во-вторых, их отсутствие не позволяет выполнить объективную независимую проверку предлагаемой модели. Единственным исключением из этого является работа [4], в которой приведены все восстановленные характеристики для Нижней Волги и Иртыша, что в принципе позволяет любому исследователю на примере реализованных речных систем независимо отрабатывать любые по сложности численные схемы интегрирования исходной системы уравнений для повышения точности расчёта и прогноза гидрографа стока.

В условиях реально существующей на реках сети гидрометрических наблюдений практически можно рассмотреть два случая её задания: 1) имеются наблюдения за расходами и уровнями в достаточно большом числе створов по длине реки; 2) уровни воды известны в достаточно большом количестве водпостов, а расходы только в начальном и конечном створах. Наибольший практический интерес представляет решение обратных задач для второго случая, позволяющего в случае решения этой проблемы существенно расширить возможности использования физически более строгих методов моделирования гидрологических процессов на большие и малые по площади водосборы с ограниченным объёмом стандартных гидрометрических наблюдений. В настоящее время существуют только два технологически реализованных метода, позволяющих реализовать алгоритмы решения обратных задач для системы уравнений (2)/(4), (3) – это подход, основанный на решении интегральных уравнений Фредгольма первого рода, и нейросетевая аппроксимация. Не останавливаясь подробно на их математической корректности выделим только наиболее важные особенности их практической реализации и пути дальнейшего развития.

Интегральные преобразования и процедуры регуляризации

В основу первого из них положена идея интегрального преобразования исходной системы уравнений (2)/(4), (3) при наличии данных наблюдений за уровнями воды в ряде пунктов по длине реки (достаточно хорошо освещающих продольный профиль), за расходами воды в начале и конце расчётного участка, а также отметками линии дна по длине расчётного участка [3]. Результатом таких интегральных преобразований служат интегральные уравнения Фредгольма первого рода $\int_a^b K(x, s)A(s)ds = U(s)$ относительно неизвестных функций $K(x, t)$ и $F(x, t)$, которые решаются при предположении, что неизвестные сглаженные морфометрические $(B(x, H); F(x, H))$ и гидравлические $(K(x, H); n(x, H))$ – коэффициент шероховатости в формуле Шези-Маннинга) характеристики

русла, могут быть представлены как функции x и H в виде разложения в ряд по фиксированным полиномам:

$$F(x_i, H) = \sum_{s=0}^m D_s(x_i) \psi_s(H) \quad (5)$$

и

$$K^*(x_i, H) = \sum_{d=0}^{m_1} P_d(x_i) \psi_d(H) \quad (6)$$

где $(i = 1, 2, \dots, N)$, $K^*(x, H)$ – условное обозначение гидравлических характеристик русла: $K(x, H)$ либо $n(x, H)$; N – число пунктов наблюдений за уровнем воды; $\psi_\beta(y)$ – полиномы Чебышева ($\beta = s, d$). Используя разложения в ряд неизвестных $K(x, t)$; $F(x, t)$ вида (5), (6), заменяя интегралы суммами по формуле трапеций можно построить систему линейных алгебраических уравнений вида

$$WD = U, \quad (7)$$

где D – вектор искомых коэффициентов разложения различного порядка.

Поскольку решение системы (7) неустойчиво, для отыскания приближенного решения D_δ^α используется функционал А. Н. Тихонова первого порядка

$$R^\alpha [D_\delta^\alpha, U_\delta] = \|WD_\delta^\alpha - U_\delta\|^2 + \alpha \|D_\delta^\alpha\|^2,$$

любой процесс минимизации которого, включая способ выбора параметра регуляризации $\alpha > 0$, будет регуляризирующим алгоритмом, обеспечивающим последовательность решения D_δ^α сходящихся к точному решению при стремлении ошибки входных данных δ к нулю. Окончательно в такой постановке минимизация функционала R^α сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений

$$(\tilde{W}^* \tilde{W} + \alpha C) D_\delta^\alpha = \tilde{W}^* U_\delta$$

при одновременном использовании трёх способов выбора оптимального параметра регуляризации (α_{op}) , позволяющих локально ограничить область существования α_{op} с помощью неравенства $\alpha_\psi \leq \alpha_{op} \leq \alpha_s \leq \alpha_\varphi$. Здесь \tilde{W} – матрица W , заданная с ошибкой δ ; \tilde{W}^* – матрица транспонированная к \tilde{W} ; C – трёхдиагональная квадратная матрица.

На рис. 1 и в таблице показаны результаты расчётов и прогнозов, выполненные в ФГБУ «Гидрометцентр России», с использованием уравнений (2)/(4), (3) при обратном восстановлении всех основных характеристик речного русла для Нижней Волги и р. Иртыш. Процедура тестирования включала в себя следующие расчётные участки:

- по Нижней Волге – от Волгоградского гидроузла до Верхнелебяжье (448 км, 9 в/п) и ниже по двум рукавам (46 км, 4 в/п и 46.5 км, 3 в/п);
- по р. Иртыш – от Усть-Каменогорской ГЭС до Усть-Ишима (2075 км, 16 в/п).

Обозначения в таблице: δ – среднее абсолютное отклонение фактических уровней воды от их рассчитанных значений за период открытого русла; Δ_j – среднее абсолютное отклонение фактических уровней воды от их прогнозируемых значений для j -го периода прогноза за несколько лет ($j = 1$ – период подъёма; $j = 2$ – период спада; $j = 3$ – межень).

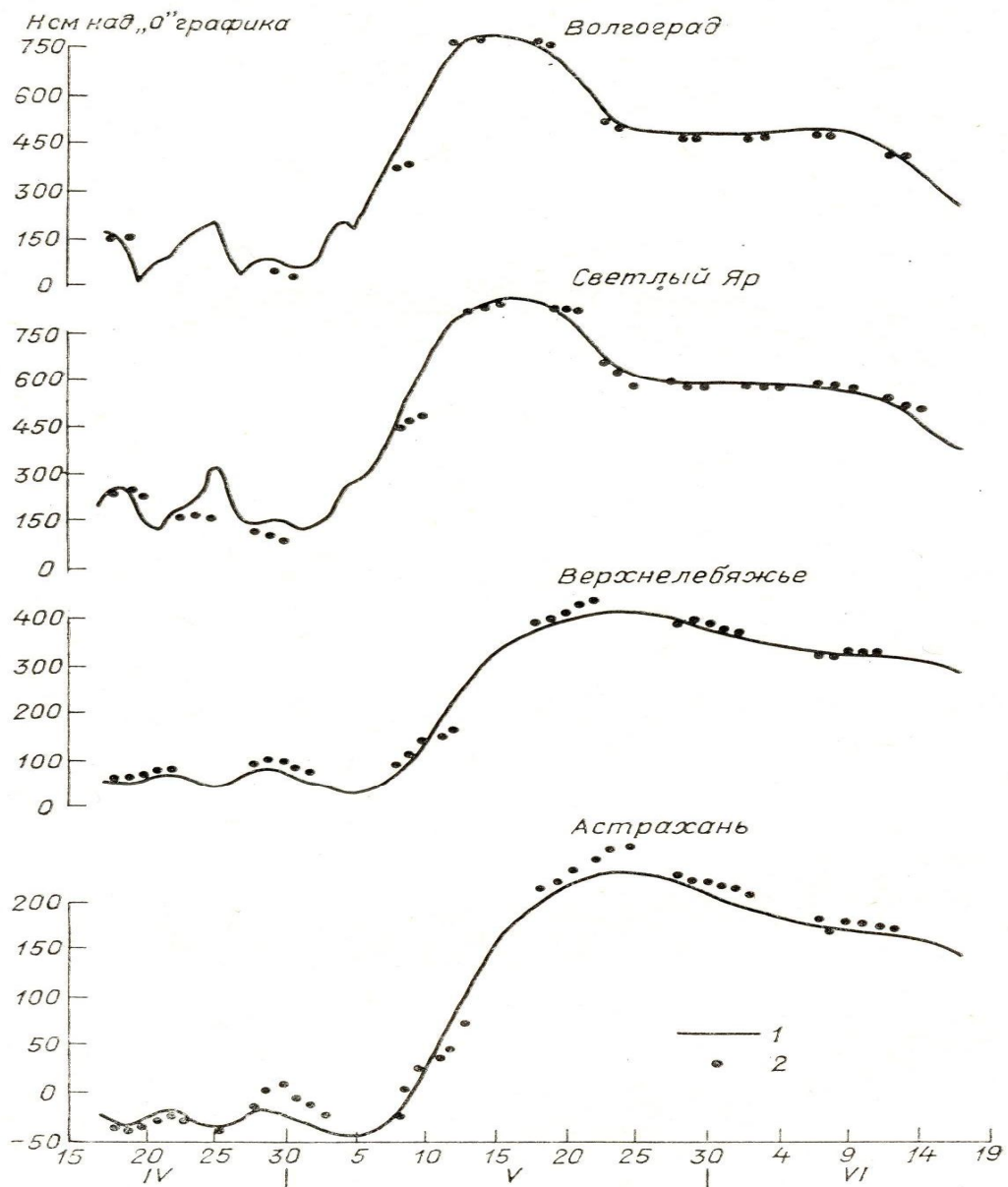


Рис. 1. Фактические (1) и рассчитанные (2) с разной заблаговременностью уровни воды р. Волги за 1980 г. (заблаговременность: Волгоград – 2 сут, Светлый Яр – 3 сут, Верхне-Лебяжье – 5 сут, Астрахань – 6 сут).

**Оценки результатов расчёта и прогноза уровней воды для ряда пунктов
Нижней Волги и Иртыша**

Оценка, см	Названия водпостов (речная система), расстояние от входного створа (км)		
	Чёрный Яр (Нижняя Волга), 139	Верхнелебяжье (Нижняя Волга), 448	Астрахань (Нижняя Волга), 494
δ	25	19	17
Оценка, см	Форпост-Убинский (Иртыш), 123	Семипалатинск (Иртыш), 241	Семиарское (Иртыш), 446
Δ_1	12	6	15
Δ_2	22	5	11
Δ_3	14	5	13

Нейросетевая аппроксимация

В последнее время наблюдается закономерный рост числа работ, посвящённых реализации теории нейронных сетей для различных приложений в области моделирования гидрологических процессов [8–10]. В частности нейросетевая постановка и метод решения обратной задачи для уравнений (2)/(4), (3) относительно неизвестных морфометрических и гидравлических характеристик русла был подробно рассмотрен в работах, выполненных по теме Минобрнауки РФ [2, 6].

Сформулируем основные положения этой работы, которая из аналоговых соображений выполнялась на примере тех же расчётных участков рек, для которых выполнен большой объём работы с использованием подхода, основанного на решении интегральных уравнений. Нейросетевая постановка задачи относительно морфометрических характеристик русла строится на основе допущения, что выходные значения площади поперечного сечения, необходимые для обучения, неизвестны. При этом результирующая нейронная сеть должна определять эти значения по координате x и динамическому уровню воды $H(x, t)$. При этом известными являются только значения расхода воды во входном и замыкающем створах. Эти положения являются базовыми при формулировании нейросетевой постановки задачи.

Схема обучения нейронной сети показана на рис. 2. В данном случае выходом сети является значение площади поперечного сечения $F(x_i, H(x_i, t)) = \tilde{A}_i(t)$ при условии, что функционал вторичной оптимизации определяется как

$$E_2 = E_1 + \alpha R,$$

где E_1 – функционал от ошибки по выходам сети, а R – регуляризационный член.

Коэффициент α регулирует влияние регуляризационных факторов на ошибку и, как следствие, на конечную нейросетевую модель речного русла. Расчёт величины E_1 проводится по соотношению

$$E_1 = \sum_{t=1}^T \varepsilon^2(t),$$

где $\varepsilon(t) = \Delta V(t) - \Delta Q(t) \Delta t$.

Фактически $\varepsilon(t)$ представляет собой разницу между дисбалансами расходов воды, вычисленных по измеренным значениям и по выходам нейронной сети. При этом вид функции G зависит от выбора структуры нейронной сети и функции активации ее нейронов. Конкретное число слоев сети и нейронов в них является предметом экспериментов. В частности вид функции G для многослойной нейронной сети с K выходами может быть записан как

$$h_k = f \left(\sum_{n_L=1}^{N_L} w_{n_L k} \cdot \dots \cdot f \left(\sum_{n_2=1}^{N_2} \left[w_{n_2 n_1} f \left(\sum_{n_1=1}^{N_1} \left[w_{n_1 m} \cdot q_m \right] + w_{n_1,0} \right) + w_{n_2,0} \right] \right) + w_{n_L,0} \right),$$

где L – число слоев нейронной сети, N_l – число нейронов в слое l , f – нелинейная непрерывно дифференцируемая функция активации нейрона.

Вид регуляризационного члена R

$$R = \alpha_1 \|\vec{W}\| + \alpha_2 \left\| S_2 \left(\frac{\partial^2 F}{\partial H^2} \right) \right\|_{L^2} + \alpha_3 \left\| S_3 \left(\left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^2 \right) \right\|_{L^2} + \alpha_4 \left\| S_4 \left(\left(\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial H} \right)^2 \right) \right\|_{L^2}$$

зависит от выбора ограничивающих условий с учётом введения ограничений на геометрию русла и штрафных функций, определяющих вклад слагаемых в регуляризационный член.

Аналогично морфометрическим характеристикам формулируется нейросетевая постановка задач для гидравлических характеристик русла. В данном случае её выходом будет $K^* = \frac{1}{K^2}$, где K – пропускная способность русла из (2)/(4)). На рис. 3 описан алгоритм, который во многом аналогичен схеме, представленной на рис. 2. Отличие состоит только в записи E_1 и R , обуславливаемое необходимостью введения дополнительных множителей,

обеспечивающих корректную размерность слагаемых в формуле ошибки. Величина E_1 рассчитывается по соотношению

$$E_1 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N q_i^2(t) \Delta x_i f \left(\sum_{k=1}^K (w_k \cdot f(x_i \cdot w_{k1} + H(x_i, t) \cdot w_{k2} + w_{k0})) + w_0 \right) - (H(0, t) - H(L, t)) \right)^2,$$

где

$$\Delta x_i = \begin{cases} \frac{x_1 - x_2}{2}, i = 1 \\ \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2}, 1 < i < N \\ \frac{x_{N-1} - x_N}{2}, i = N \end{cases}, \text{ а } q_i^2(t) - \text{расходы воды в точке } x_i, \text{ рассчитанные с}$$

использованием значений $\tilde{A}_i(t)$, восстановленных ранее в соответствии со схемой на рис. 1.

Для оценки регуляризационного члена R использовано соотношение вида

$$R = \alpha_1 \|\vec{W}\| + \alpha_2 \left\| S_2 \left(\frac{\partial K^*}{\partial H} \right) \right\|_{L^2} + \alpha_3 \left\| S_3 \left(\frac{\partial K^*}{\partial x} \right) \right\|_{L^2} \text{ с введением физических ограничений на}$$

изменение коэффициента шероховатости (n), определяющего пропускную способность русла через формулу Шези-Маннинга. В рамках этих допущений искомая функция K^* будет выглядеть следующим образом

$$K^* = \frac{B^{4/3}}{\tilde{A}^{10/3}} n^2,$$

где $B = \frac{\partial F}{\partial H}$.

Восстановленные таким образом основные характеристики русла использовались в задаче расчёта (прогноза) уровней и расходов воды по длине расчётного участка – прямая задача. На рис. 4 а,б приведены результаты таких расчётов для двух водпостов Нижней Волги (Чёрный Яр и Сероглазовка) для 1978 г. с использованием восстановленных основных характеристик русла по материалам наблюдений за 1967–1977 гг.

Заключение

Анализ современных представлений о возможностях постановки и решения обратных задач русловой гидравлики в её одномерном приближении показывает, что относительно длительный период отсутствия работ в этом направлении наконец пройден. Реализация нейросетевой аппроксимации для восстановления основных характеристик русла,

выполненная с использованием исходных данных наблюдений за водным режимом аналогичных тем, которые были реализованы для метода, основанного на интегральных преобразованиях исходной системы уравнений, практически полностью доказали правильность такого подхода. Сопоставление восстановленных характеристик русла показало их достаточную идентичность при использовании данных наблюдений за разные периоды времени (рис. 5, 6).

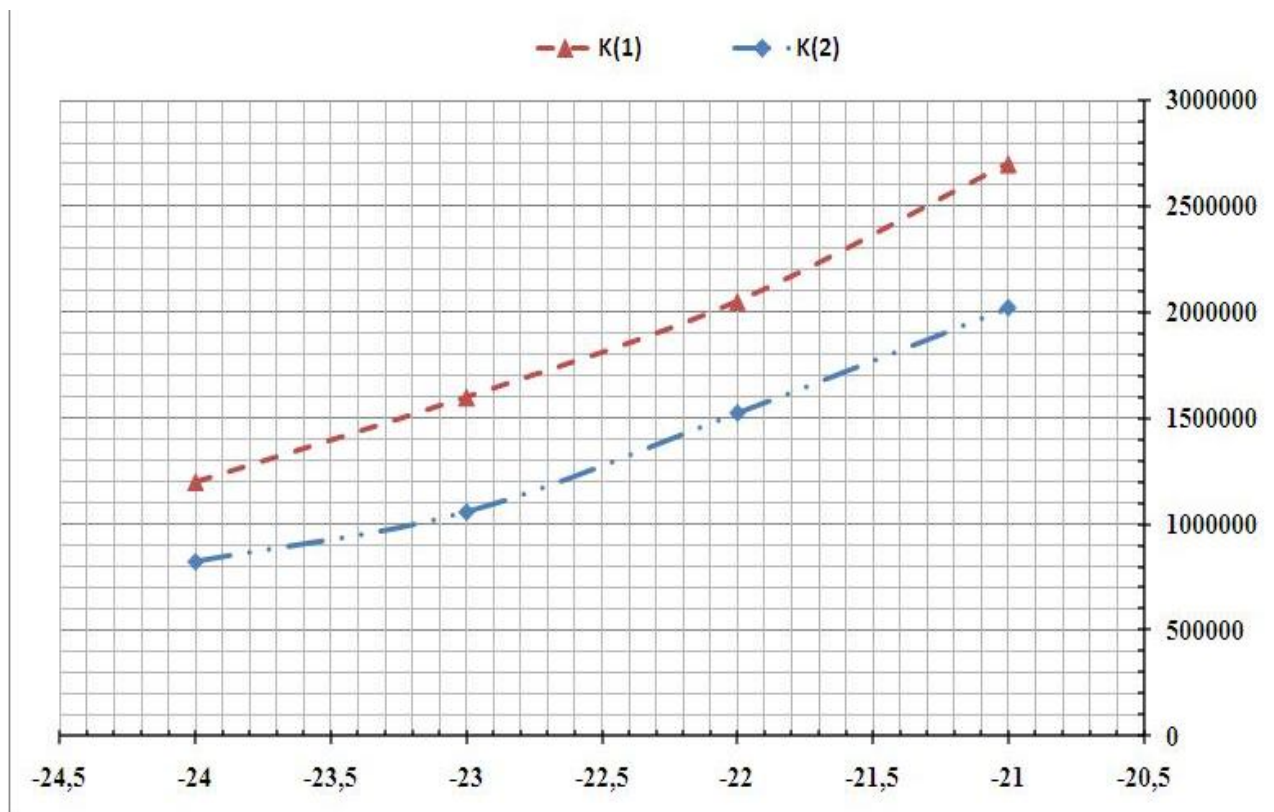


Рис. 5. Значения восстановленного модуля расхода воды для водпоста Енотаевка ($K(1)$ – интегральные преобразования и регуляризация; $K(2)$ – нейросетевая аппроксимация).

Выделим несколько основных направлений, определяющих перспективы совершенствования разработанных методов идентификации сложного речного русла с использованием рассмотренных методов решения обратных задач.

- Первое из них – это максимально возможное по точности выполнение балансового соотношения сохранения объёма воды между входным и замыкающим створами расчётного участка с учётом всех сосредоточенных притоков при формировании исходных функционалов. Невыполнение этого условия практически всегда говорит либо о

недостаточной точности гидрометрических измерений расхода воды по длине расчётного участка реки, либо о неучтённых потерях стока.

- Второе направление состоит в более полном усвоении как оперативной, так и архивной режимной исходной информации о водном режиме при формировании матриц плана.

- Третье направление связано с мониторингом продольного профиля русла (линии отметок дна), задание которого в пунктах наблюдений за уровнем воды является необходимым и достаточным условием статистически более надёжного определения искомых функций с использованием SVD-анализа для методов, основанных как на интегральных преобразованиях исходной системы уравнений, так и нейросетевой аппроксимации.

- Особое значение с учётом выделенных направлений приобретают работы по реализации рассмотренных подходов для сложных речных русел, по которым были выполнены детальные измерения морфометрии с GPS-привязкой на местности и последующей ГИС-обработкой. В настоящее время такие данные есть по ряду речных систем мира. Существенно, что независимо от используемого подхода по восстановлению гидравлики русла наличие данных по морфометрии позволяет уточнить процедуру восстановления функций $K(x,H)$, $n(x,H)$, что физически является более строгим по сравнению с традиционно используемыми константами для коэффициента шероховатости в формуле Шези-Маннинга.

В заключении следует подчеркнуть, что только комплексное решение всех выделенных здесь задач с детальным анализом статистических погрешностей, связанных с использованием восстановленных функций B , F , K , n в задачах расчёта и прогноза водного режима, позволит реально оценить преимущества и недостатки рассмотренных алгоритмов в сравнении с традиционно используемыми и несопоставимо более затратными по стоимости методами измерений этих характеристик в природе. Очевидно, что осуществить одновременно программу реализации всех этих направлений практически невозможно. Потребуется достаточно много усилий вполне сопоставимых с объёмом работы, выполненных в Инженерном корпусе армии США, ведущих исследования в адаптации модели HEC-RAS начиная с 1992 г.

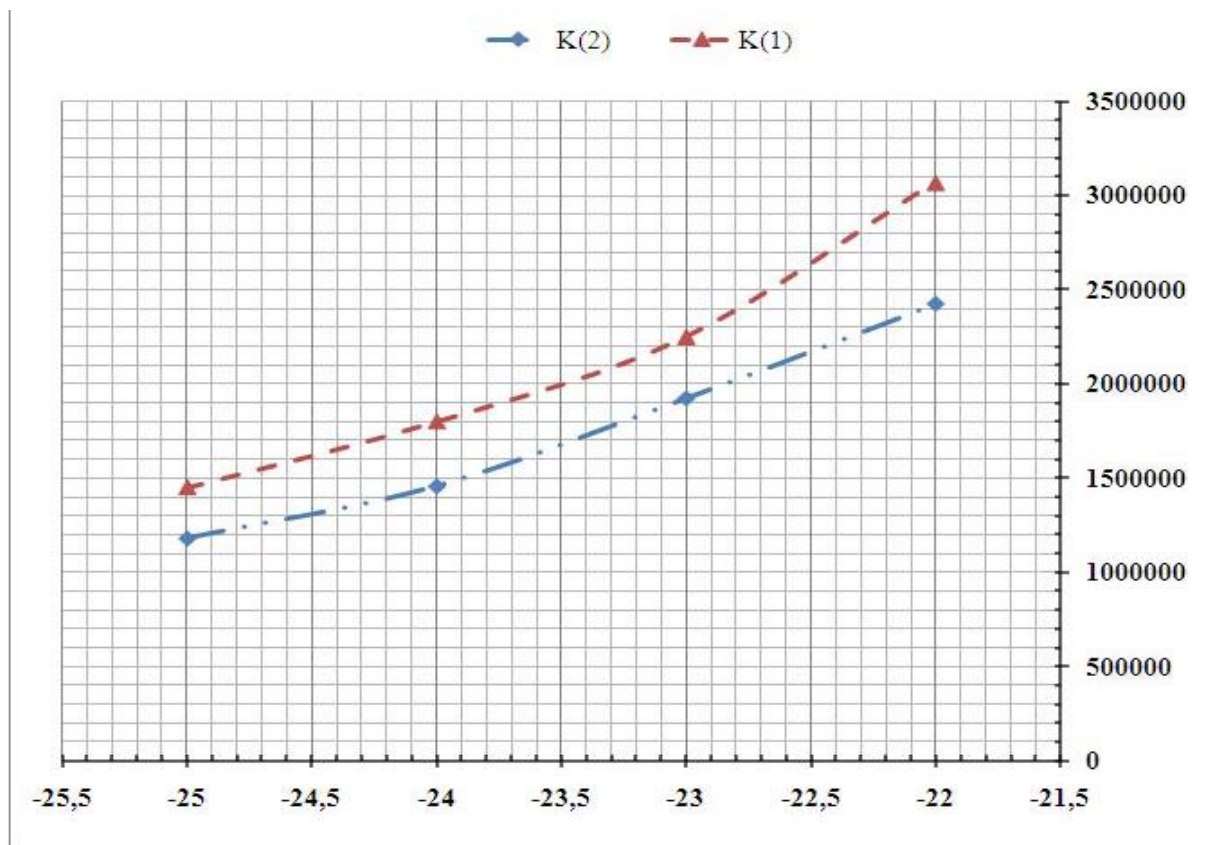


Рис. 6. Значения восстановленного модуля расхода воды для водпоста Сероглазовка как функции уровня воды ($K(1)$ – интегральные преобразования и регуляризация; $K(2)$ – нейросетевая аппроксимация).

Список использованных источников

1. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 198 с.
2. Отчёт о научно-исследовательской работе «Решение обратных задач на основе математических моделей формирования пространственно-временных характеристик русел рек для оперативных краткосрочных прогнозов паводков и половодья с использованием многоядерных суперЭВМ». – Тема Минобрнауки РФ. – Лот 1 Шифр: 2011–1.5–515–020 (регистрационный номер заявки: 2011–1.5–515–020–037). – 2012. – 146 с.
3. Романов А.В. О технологии идентификации одномерной модели неустановившегося движения воды в сложном речном русле // Мелиорация и водное хозяйство. – 2009. – № 4. – С. 37–41.
4. Романов А.В. Обратные задачи математического моделирования неустановившегося движения воды в реках. – М.: Научный мир, 2008. – 184 с.

5. *Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2.* – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 246 с.
6. *Черкезов Р.И.* Регуляризация обратной задачи при гидродинамическом моделировании речного стока с применением нейронных сетей // М.: Международный научный журнал. – 2012. – № 5. – С. 77–82.
7. *Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices.*// WMO–No. 168. – Sixth edition. – 2009. – 302 p.
8. *Satyaji Rao Y.R., Krishna B.* Modelling hydrological time series data using wavelet neural network analysis // IAHS Publ. 333. – 2009. – P. 101–111.
9. *Tokar A.S., Johnson P.A.* Rainfall runoff modeling using artificial neural network // J. Hydrologic Engng ASCE. – 4(3). – 199. – P. 232–239.
10. *Xiao F., Gao C., Zhang J.* Short-term prediction on parameter-varying systems by multiwavelets neural network // Lecture Notes in Computer Science (LNCS) No. 3611. – 2005. – Springer-Verlag, Berlin, Germany. – P. 139–146.

Поступила в редакцию 20.02.2013 г.

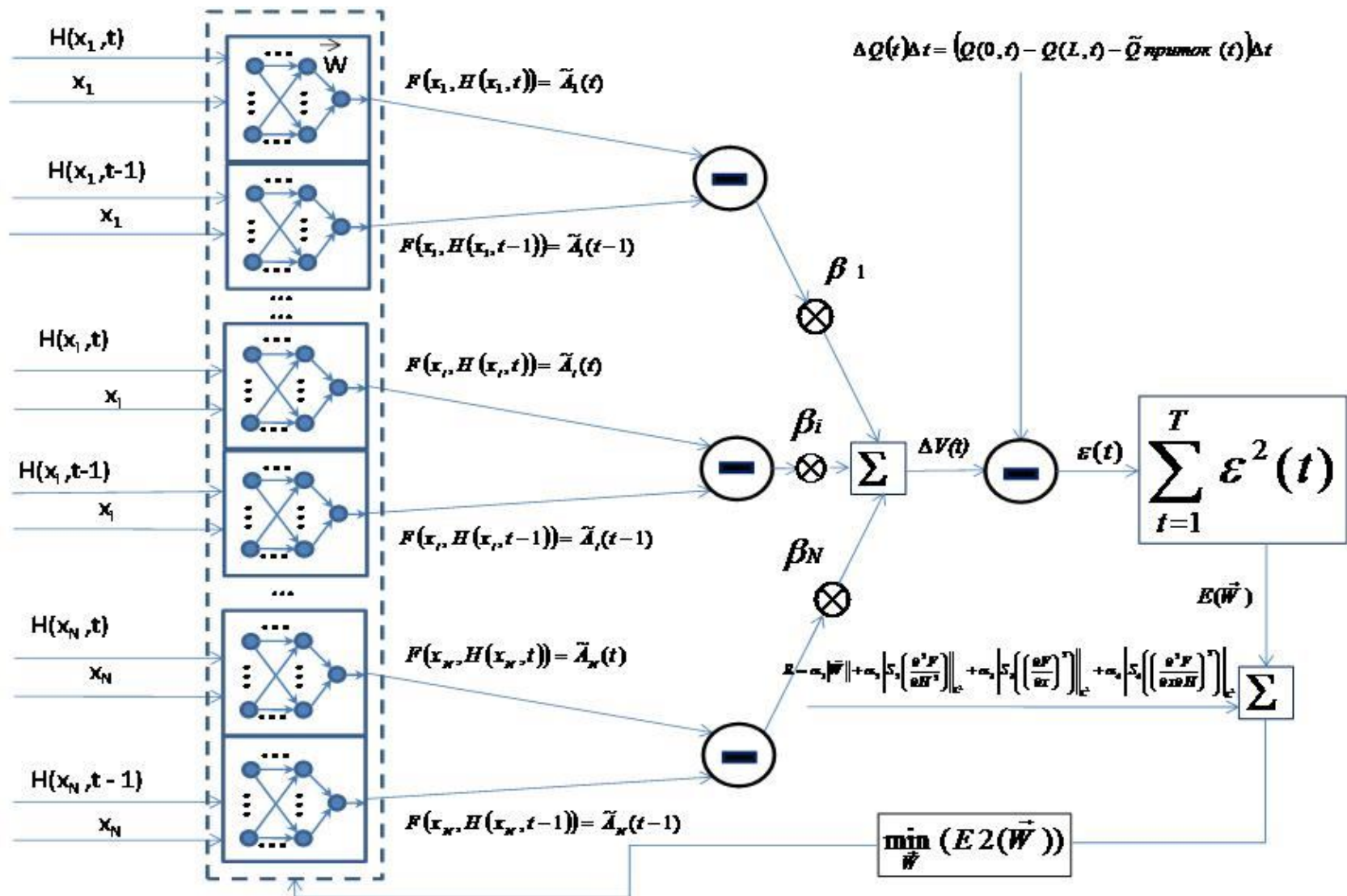


Рис. 2. Схема обучения нейронной сети при постановке задачи определения морфометрических характеристик русла.

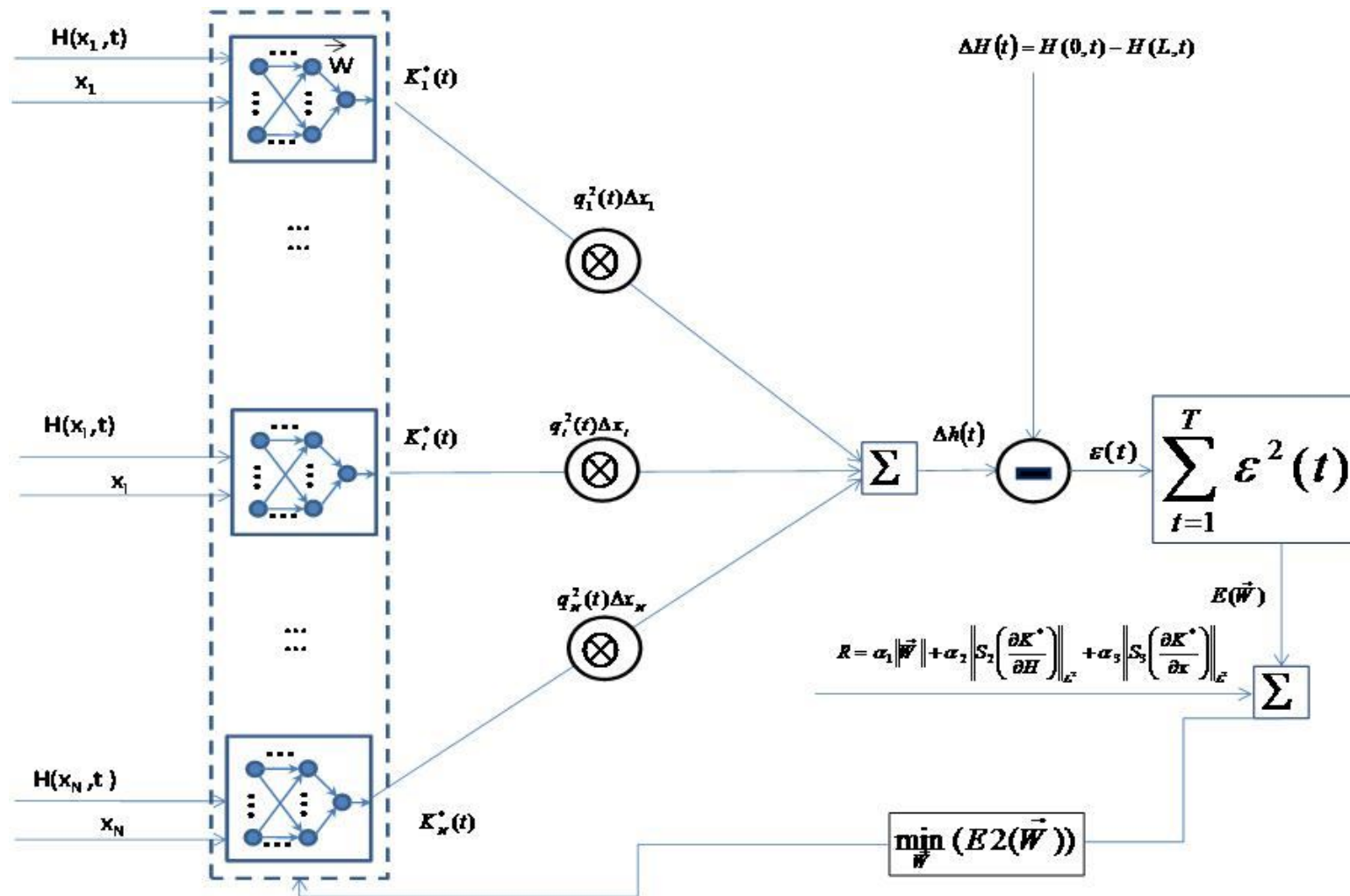
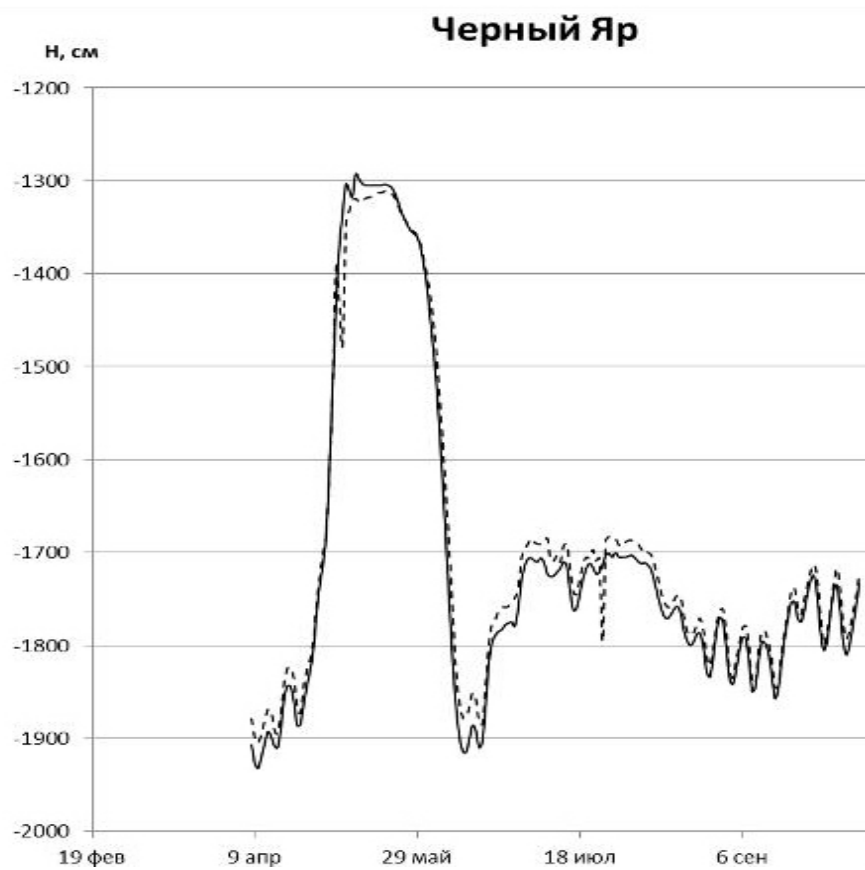


Рис. 3. Схема обучения нейронной сети при постановке задачи определения гидравлических характеристик русла.



а)



б)

Рис. 4. Фактические и рассчитанные уровни воды р. Нижней Волги за 1978 г. для водпостов Чёрный Яр (а) и Енотаевка (б).