

УДК 556.5:627.8

© А. В. Рахуба^{1*}, М. В. Шмакова², С. А. Кондратьев²

¹Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна РАН, 445003, ул. Комзина, д. 10, г. Тольятти, Россия

²Институт озерадения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», 196105, Севастьянова, д. 9, г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: rahavum@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В ПРОТОЧНОМ ВОДОЕМЕ

Статья поступила в редакцию 23.04.2020, после доработки 07.10.2020

Представлена модель массопереноса в Куйбышевском водохранилище, разработанная на основе системы уравнений «мелкой воды», модели конвективно-диффузионного переноса растворенного вещества, а также аналитических формул для расчета общего расхода наносов и мутности воды. Модель была использована для оценки геоэкологического состояния Куйбышевского водохранилища в части качества воды. Оценка параметров модели выполнена с применением данных натурных изменений в пунктах мониторинга. Проведена серия имитационных расчетов течений в акватории водохранилища, распространения шлейфов вод притоков и переноса взвешенных частиц при различных гидрометеорологических ситуациях в условиях средней водности. Показано, что скорости и траектории распространения речных водных масс зависят как от наличия ветровой циркуляции течений, так и от режима стока в акватории. Формирование пространственной конфигурации шлейфов речных вод в плёсовых районах водохранилища определяется скоростью и направленностью циркуляционных ветровых течений. Значения удельного расхода наносов в водохранилище при сильных ветрах меняются на порядок. В результате решения поставленной задачи продемонстрированы возможности представленной модели и дана оценка распространения растворенной примеси (возможно загрязненной), а также транспорта и переотложения речных наносов в различных точках акватории при различных гидрометеорологических условиях.

Ключевые слова: математическое моделирование, общая минерализация, Куйбышевское водохранилище, расход наносов, мутность воды.

© А. В. Rakhuba^{1*}, М. В. Shmakova², S. A. Kondratyev²

¹Samara Federal Research Scientific Center of RAS, Institute of Ecology of the Volga River Basin of RAS, 445003, Komzina Str., 10, Togliatti, Russia

²Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, 196105, Sevastyanova Str., 9, St. Petersburg, Russia

*E-mail: rahavum@mail.ru

MATHEMATICAL MODELING OF MASS TRANSFER IN A FLOWING RESERVOIR

Received 23.04.2020, in final form 07.10.2020

The paper presents a model of mass transfer in the Kuibyshev Reservoir, developed on the basis of a system of equations of “shallow water”, a model of convective-diffusion transfer of a dissolved substance, as well as analytical formulas for calculating the total sediment discharge and water turbidity. The model was used to assess the geoeological state of the Kuibyshev Reservoir in parts of water quality. The model parameters were evaluated using data from field changes at monitoring points. A series of simulation calculations of flows in the water area of the reservoir, the spread of tributary water plumes and the transport of suspended particles in various hydrometeorological situations in the conditions of average water content was carried out. It is shown that the velocity and trajectory of river water mass distribution depend on both the presence of wind circulation of currents and the flow regime in the water area. The formation of the spatial configuration of river water plumes in the plyos areas of the reservoir is determined by the speed and direction of circulating wind currents. The values of the specific discharge of sediment in the reservoir during strong winds change by an order of magnitude. As a result of solving this problem, the capabilities of the presented model are demonstrated and the estimation and forecast of the distribution of dissolved admixture (possibly contaminated), as well as the transport and re-deposition of river sediments in different points of the water area under different hydrometeorological conditions are given.

Key words: mathematical modeling, reservoir, shallow water equations, convective-diffusion transfer, sediment flow, water turbidity

Ссылка для цитирования: Рахуба А.В., Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Численное моделирование массопереноса в проточном водоеме // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 2. С. 89–97. doi: 10.7868/S2073667321020088

For citation: Rakhuba A.V., Shmakova M.V., Kondratyev S.A. Mathematical Modeling of Mass Transfer in a Flowing Reservoir. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 2, 89–97. doi: 10.7868/S2073667321020088

1. Введение

Наблюдения за гидродинамикой, а также переносом растворенных веществ и взвешенных частиц в акваториях крупных водоемов в настоящее время нерегулярны и нередко затруднены в условиях экстремальных гидрометеорологических явлений (штормовых ветрах, высоких паводках и половодьях). В этих случаях математическое моделирование дает возможность оценить пространственно-временные особенности и закономерности течений и распределения мутности в акватории в режиме численного эксперимента при воспроизведении различных неблагоприятных гидрометеорологических ситуаций. Результаты такого моделирования могут быть востребованы при планировании водохозяйственной деятельности на водохранилище (оценка и прогноз качества воды в различных частях водоема, в том числе — в пунктах водозабора, размыва берегов, занесения фарватеров и др.).

Первые работы, посвященные анализу циркуляции и качеству водных масс Куйбышевского водохранилища, приходится на начальный период его существования [1, 2]. Результаты анализа динамики водных масс и характера донных отложений водохранилища представлены в работах П.Ф. Чигиринского, С.А. Поддубного, Ю.С. Даценко и других исследователей [3–6]. При этом, наиболее детальная гидродинамика (пространственный шаг 200 м) с комплексным анализом двухфазной циркуляции водных масс впервые была рассчитана авторами данной работы и опубликована в 2015 г. [7].

Целью настоящего исследования являлась оценка особенностей и закономерностей течений, распространения шлейфов вод притоков и переноса взвешенных частиц в различных гидрометеорологических ситуациях применительно к условиям Куйбышевского водохранилища по результатам имитационного моделирования.

2. Структура модели

Представленная модель массопереноса в Куйбышевском водохранилище основана на системе уравнений теории длинных волн, так называемых уравнениях «мелкой воды» и модели конвективно-диффузионного переноса растворенного вещества, реализованные в программном комплексе «ВОЛНА» [8, 9], а также аналитической формуле для расчета общего расхода наносов и мутности воды [10, 11]. Полагается, что при незначительных концентрациях твердого вещества в потоке и скоростях течения допустим невзаимосвязанный расчет водного потока и транспорта наносов [12]. При этом взвешенное вещество, находящееся в водной массе, не оказывает влияния на гидравлические переменные состояния потока. Система уравнений модели в двумерной постановке имеет следующий вид:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - lv = C_a \frac{\rho_a}{\rho H} W_{(x)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H} u |V| + K_L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + lu = C_a \frac{\rho_a}{\rho H} W_{(y)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H} v |V| + K_L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h+\zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h+\zeta)v]}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = -rC + E \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

где $u(x, y, t)$ и $v(x, y, t)$ — усредненные по глубине продольная и поперечная скорости, м/с; $h(x, y, t)$ — невозмущенная глубина, м; $\zeta(x, y, t)$ — уровень свободной поверхности, м; x и y — декартовы координаты расчетной сетки, м; $H = (h + \zeta)$ — полная глубина, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; $l = 2\omega \sin(\psi)$ — параметр Кориолиса ($\omega = 2\pi/\text{сут}$ — угловая скорость вращения Земли, рад/сут; ψ — географическая широта, рад); c_a — коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности, б/р; $W_{(x)}$ и $W_{(y)}$ — компоненты составляющей скорости ветра, м/с; W — результирующий вектор скорости ветра, м/с; V — результирующий вектор скорости течения, м/с; $f_{\text{дно}} = \frac{gn^2}{H^{1/3}}$ — коэффициент придонного трения, б/р; n — коэффициент шероховатости, б/р; K_L — горизонтальный турбулентный обмен, м²/с; P_a — атмосферное давление, кг/(м·с²); C — концентрация растворенного вещества, г/м³; E — коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии вещества, м²/с; r — коэффициент неконсервативности вещества, б/р.

Уравнения гидродинамики (1), (2) и (3) решались при задании следующих граничных условий для u , v , ζ . На твердых боковых границах нормальная компонента скорости u_n равна нулю. Для тангенциальной компоненты u_τ вводится квадратичный закон трения, аналогичный придонному. Таким образом, граничное условие на твердых боковых границах имеет вид:

$$u_n = 0, K_L \frac{\partial u_\tau}{\partial n} = -f_b u_\tau |V|, \quad (5)$$

где f_b — безразмерный коэффициент бокового трения, который рассчитывается аналогично $f_{\text{дно}}$.

На открытых боковых границах одним из граничных условий является равенство нулю касательной к границе составляющей скорости: $u_\tau = 0$, второе граничное условие может быть разных типов. Для первого типа задается нормальная компонента скорости как функция времени: $u_n = f(t)$. Для второго типа задается уровень воды: $\zeta = \zeta(t)$. Для третьего типа задается линейная зависимость между нормальной компонентой скорости и уровнем $u_n = \pm(g/h)^{1/2} \zeta$.

Уравнение конвективно-диффузионного переноса растворенных веществ в воде (4) решается при граничных условиях на боковой поверхности типа:

$$\varphi C + E \frac{\partial C}{\partial n} = \theta(x, y, t), \quad (6)$$

где n — нормаль к боковой поверхности расчетной области.

Функция θ задает источники поступления веществ на боковой поверхности; $\varphi = \theta = 0$ соответствует случаям для непроницаемых границ и открытых границ, через которые вода вытекает из расчетной области. На открытых боковых границах, через которые вода втекает в расчетную область, задается концентрация вещества. Начальное состояние на акватории характеризуется фоном $C_0 = C|_{t=0}$.

Для получения численного решения уравнений (1)–(3) была использована схема Кранка-Николсона с применением метода расщепления второго порядка точности [13]. При решении уравнения (4) использовалась явно-неявная схема попеременных направлений. На первом полушаге аппроксимировались неявно производные по направлению x , а производные по направлению y при этом — явно. На втором полушаге неявно аппроксимировались производные по направлению y , явно — по направлению x [14].

Аналитические формулы расчета общего расхода наносов и мутности воды [11] имеют вид:

$$G(x, y, t) = \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} Q(x, y, t) \left[\frac{C_{\text{гр}}}{H(x, y, t)g} - (1-f)\rho_{\text{в}}I \right], \quad (7)$$

$$S(x, y, t) = 10^3 \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} \left[\frac{C_{\text{гр}}}{H(x, y, t)g} - (1-f)\rho_{\text{в}}I \right], \quad (8)$$

где $G(x, y, t)$ — общий расход наносов, кг/с; $Q(x, y, t)$ — расход воды, м³/с; $S(x, y, t)$ — мутность воды, г/м³; $\rho_{\text{гр}}$ и $\rho_{\text{в}}$ — плотность грунта и воды соответственно, кг/м³; I — уклон дна; H — глубина потока, м; f — коэффициент внутреннего трения, б/р (допускается значение $f > 1$); $C_{\text{гр}}$ — сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²).

3. Объект моделирования

Объектом исследования является самое крупное водохранилище Волжского каскада — Куйбышевское, образованное в 1955 г. при зарегулировании реки у г. Жигулевска. Заполнение водохранилища проходило в три этапа. В 1957 г. уровень воды достиг проектной отметки 53.0 м Балтийской Системы. После сооружения Чебоксарской и Нижнекамской ГЭС площадь водного зеркала водохранилища составила 5900 км², а его общая емкость при нормальном подпорном уровне (НПУ) — 58.0 км³. Общая длина по затопленному руслу р. Волги составляет 510 км, наибольшая ширина — 27 км. Основное питание Куйбышевского водохранилища осуществляется с вышележащих Чебоксарского и Нижнекамского водохранилищ [15].

Расчеты пространственного распределения течений, минерализации и мутности воды в акватории Куйбышевского водохранилища выполнялись для условий средней водности. В качестве тестового был выбран 1969 год. Моделирование выполнялось для всего водохранилища, ограниченного на западе Чебоксарским и на востоке Нижнекамским входными створами гидроузлов, соответственно расположенных на Волжской и Камской ветках водохранилища, и на юге — замыкающим створом Жигулевского гидроузла. В расчетах учтено влияние таких притоков как Вятка, Свияга, Казанка, Мёша и Большой Черемшан.

В качестве исходных данных на входных створах для уравнений гидродинамики (1), (2), (3), конвективно-диффузионного переноса растворенных веществ (4) на открытых боковых границах, через которые вода поступает в расчетную область, задавались постоянные расход воды и общая минерализация (табл. 1) [16, 17]. Также на открытых границах задается направление потока для источника.

Расчеты полей течения и распространения шлейфов вод притоков в водохранилище проводились для стационарного режима расхода при отсутствии ветра, а также для меженного периода доминирующих направлений ветра с постоянной скоростью 15 м/с. По данным многолетних наблюдений Росгидромета [18] за ветром в Куйбышевском водохранилище, в период летне-осенней межени преобладают ветра северного и юго-западных румбов. Штормовые ветры со скоростью более 15 м/с могут длиться от нескольких часов до суток и более и охватывать всю площадь водохранилища.

Акватория Куйбышевского водохранилища была разделена на 143562 расчетных узла прямоугольной сетки с шагом 200 м. Значения параметров гидродинамической модели были получены в ходе процедуры идентификации и составили для: шероховатости дна $n = 0.038$, бокового трения $f_{бок} = 0.01$, горизонтального турбулентного обмена $K_L = 225 \text{ м}^2/\text{с}$. В конвективно-диффузионной модели переноса вещества для расчета минерализации воды коэффициент неконсервативности вещества был принят равным $r = 0$ и коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии — $E = 3.0 \text{ м}^2/\text{с}$. Модельный шаг по времени задавался равным 5 с.

Калибровка параметров конвективно-диффузионной модели переноса вещества для расчета минерализации воды проводилась по данным наблюдений на рейдовых вертикалях водохранилища [18] для периода летней межени 1959–1972 гг. (табл. 2). Относительные отклонения между рассчитанными $C_{рас}$ и наблюдаемыми $C_{набл}$ средними по вертикали значениями минерализации воды составили от 1 до 17 %.

Калибровка параметров аналитических формул расхода наносов проводилась по данным наблюдений на вертикалях водохранилища [16] для периода летней межени 1969 года (табл. 3). Относительные отклонения между рассчитанными ($S_{рас}$) и наблюдаемыми ($S_{набл}$) средними по вертикали значениями мутности воды составили от 3 до 41 %.

Таблица 1

Входные данные для расчетов на модели Куйбышевского водохранилища

Input data for calculations on the Kuibyshev reservoir model

Название входного створа	Расход воды, м ³ /с	Минерализация воды, г/м ³	Мутность воды, г/м ³
Чебоксарская ГЭС	2450	213	11.2
Нижнекамская ГЭС	1600	215	12.0
р. Вятка	830	300	46.3
р. Свияга	41	656	26.8
р. Казанка	13	955	44.5
р. Мёша	21	915	42.1
р. Черемшан	41	620	14.6

Таблица 2

Наблюдаемые и рассчитанные по вертикали средние значения общей минерализации в период летней межени за 1959–1972 г.

Observed and vertically Calculated average values of total mineralization during the summer low water period for 1959–1972

№ вертикали	Пункт	Общая минерализация воды $C_{изм}$, г/м ³	Общая минерализация воды $C_{расч}$, г/м ³	Скорость течения $v_{изм}$, м/с	Скорость течения $v_{расч}$, м/с	Глубина $h_{расч}$, м
66	с. Вязовые	245.2	217.4	0.17	0.254	7.93
70	г. Чистополь	291.0	256.3	—	0.071	5.10
54	ГМС-2	266.2	264.6	—	0.042	6.75
50	г. Тетюши	247.5	256.1	0.06	0.036	16.92
40	г. Ульяновск	218.6	253.3	0.20	0.196	15.43
1	г. Тольятти	217.2	249.5	0.16	0.054	39.77

Таблица 3

**Наблюдаемые и рассчитанные средние по вертикали гидравлические переменные состояния
в период летней межени за 1969 г.**

Observed and calculated vertical average hydraulic state variables during the summer low Water period for 1969

№ вертикали	Пункт	Расход наносов $G_{расч}, \text{ г/с}\cdot\text{м}^2$	Мутность воды $S_{изм}, \text{ г/м}^3$	Мутность воды $S_{расч}, \text{ г/м}^3$	Скорость тече- ния $v_{изм}, \text{ м/с}$	Скорость течения $v_{расч}, \text{ м/с}$	Глубина $h_{расч}, \text{ м}$
66	с. Вязовые	3.86	15.4	15.0	0.17	0.254	7.93
50	г. Тетюши	0.47	11.7	12.9	0.06	0.036	16.92
63	с. Ундоры	0.31	14.7	14.1	0.08	0.022	9.87
5	с. Климовка	0.35	21.0	12.4	0.10	0.029	37.81
1	г. Тольятти	0.65	9.02	12.2	0.16	0.054	39.77

Начальное значение минерализации для всей акватории водохранилища задавалось равной 213 г/м^3 , а для мутности рассчитывались в соответствии с начальными условиями задания гидравлических переменных состояния потока (средние в ячейке глубина и скорость) в расчетных ячейках. Для притоков водохранилища параметры формул расхода наносов и мутности воды были назначены в соответствии с их уклонами и крупностью донных отложений. Рассчитанная по модели мутность соответствует средней по глубине мутности воды, которой характеризуется текущая расчетная ячейка. Задание штормовых ветров осуществлялось после выхода модели гидродинамики на стационарный режим расчета спустя 300000 с расчетного времени. Затем рассчитывалось поле общей минерализации при постоянном меженном расходе в водохранилище, которое составило 95 сут расчетного времени. Продолжительность вычислений всех последующих характеристик с ветровым воздействием составила около четырех суток для ветра каждого направления.

4. Результаты расчетов

Движение водных масс летом в крупных долинных водохранилищах осуществляется под воздействием стоковых течений и ветровых воздействий. Стоковые течения в основном преобладают в Волжском и Камском районах переменного подпора, а также хорошо прослеживаются вдоль правого берега Куйбышевского водохранилища. В условиях ветрового воздействия в центральных плёсах водохранилища формируется сложная циркуляция течений. Поля ветровых течений представляют собой противоположно направленные и сильно изогнутые потоки воды. Потоки с малыми скоростями ветровых течений образуют зоны концентрирования речных водных масс. В Куйбышевском водохранилище такие зоны расположены в устьевых областях рек Свияги, Казанки, Меши и Черемшанском заливе. В открытой части плёсов сосредоточены потоки с повышенными скоростями ветровых течений, которые способствуют разбавлению и выравниванию концентрации водных масс.

На рис. 1 и рис. 2 (см. вклейку) показаны модельные расчеты траекторий течений в районе впадения р. Меша и р. Черемшан при юго-западном и северном направлении ветра. В Волжско-Камском и Верхнететюшском плёсах при юго-западном направлении ветра возникают крупные вихревые движения воды циклональной направленности, которые целиком захватывают пространство плёсов. Наряду с этим возникают вихри меньших масштабов антициклональной направленности в устьевой области (заливе) р. Мёша и мелкомасштабные вихри циклональной направленности в левобережной мелководной части Волжско-Камского плёса. При северном направлении ветра возникает крупномасштабная антициклональная циркуляция и мелкомасштабная циклональная циркуляция вод в заливе р. Мёша. Орбитальные скорости в крупномасштабных вихрях Волжско-Камского и Верхнететюшского плёсах достигают $10\text{--}15 \text{ см/с}$, в вихрях средних и малых размерах — $2\text{--}5 \text{ см/с}$. В Нижнеульяновском плёсе при юго-западном направлении ветра возникает левобережная циклональная циркуляция, а в Черемшанском заливе потоки воды разбиваются на несколько мелкомасштабных вихрей и один крупномасштабный циклональный вихрь. В Новодевичьем плёсе также ярко выражена циклональная траектория движения вод. При северном ветре появляются правобережные противотечения в Новодевичьем плёсе и Черемшанском заливе. Наибольшие орбитальные скорости в крупномасштабных вихрях в этом районе достигают $7\text{--}12 \text{ см/с}$, в вихрях меньших размеров — $1\text{--}4 \text{ см/с}$. В Приплотинном плёсе при ветрах северной и юго-западной направленности циркуляционных течений не возникает.

Результаты расчета вихревых течений в Куйбышевском водохранилище хорошо согласуются с данными натурных наблюдений, опубликованных в работах П.Ф. Чигиринского и А.С. Поддубного [2, 3, 19]. Авторы отмечают, что горизонтальный масштаб циркуляционных образований в Куйбышевском водохранилище может составлять от 200–600 м до 30–40 км, а скорости таких течений изменяются от 3 до 20 см/с.

В качестве индикатора для расчета распространения водных масс от боковых притоков Куйбышевского водохранилища использовался консервативный показатель общей минерализации воды. По этому показателю в водохранилище лучше всего выделяются шлейфы водных масс в Волжско-Камском плёсе от р. Меша и в Новодевичьем плёсе от р. Черемшан (рис. 3, см. вклейку). Воды рек Свияги, Казанки и Вятки впадают в русловых частях водохранилища, где преобладают высокие скорости стокового течения (10–35 см/с) и соответственно их шлейфы слабо выражены в силу достаточно хорошего перемешивания.

Воды р. Мёша распространяются вдоль северо-западного побережья водохранилища и занимают значительную часть акватории Волжско-Камского и небольшую часть акватории Верхнететюшского плёсов (рис. 1). Конфигурация шлейфа реки имеет вытянутую с севера на юг неправильную форму, которая определяется направленностью стокового и ветровых течений. Диапазон значений минерализации шлейфа р. Мёша в водохранилище составляет 260–915 г/м³. В табл. 4 представлены характеристики шлейфа р. Мёша при ветрах доминирующих направлений.

Воды р. Черемшан распространяются в акватории обширного залива и далее вытягиваются вдоль левого берега Новодевичьего плёса (рис. 2). Формирование геометрии шлейфа вод реки в значительной степени зависит от направленности течений. Максимальная длина шлейфа формируется при северном ветре, достигая Приплотинного плёса водохранилища. Значения минерализации воды в шлейфе р. Черемшан составляют 260–620 г/м³. Характеристики шлейфа р. Черемшан при ветрах доминирующих направлений представлены в табл. 5.

Реки Свияга и Казанка впадают в Волжскую ветку, а р. Вятка — в Камскую ветку Куйбышевского водохранилища, где режимы течений определяют гидроузлы Чебоксарской и Нижнекамской ГЭС. Расчеты показывают, что ветер не оказывает существенного влияния на направленность течений в этих районах водохранилища. Воды р. Свияги вытягивается узким шлейфом вдоль правого берега, сливаясь с водами р. Казанки и далее единой водной массой распространяются вдоль левого берега на 35 км ниже по течению до полного перемешивания с Волжскими водами. Фоновая концентрация в Волжской ветке водохранилища до впадения притоков составляет 213 мг/л. В створе полного смешения общая минерализация достигает

Таблица 4

Характеристика шлейфа р. Мёша
Characteristics of the plume of the Mesha River

Характеристика	Шлейф р. Мёша (диапазон минерализации 260–915 мг/л)		
	Штиль	Север	Юго-запад
Направление ветра			
Фоновая концентрация, мг/л	250	250	250
Длина шлейфа, км	54	52	51
Максимальная ширина шлейфа, км	7.5	12.1	8.2
Площадь шлейфа, км ²	278	271	264

Таблица 5

Характеристика шлейфа р. Черемшан
Characteristics of the plume of the Cheremshan River

Характеристика	Шлейф р. Черемшан (диапазон минерализации 260–620 мг/л)		
	Штиль	Север	Юго-запад
Направление ветра			
Фоновая концентрация, мг/л	250	250	250
Длина шлейфа, км	84	94	78
Максимальная ширина шлейфа, км	19.7	19.7	19.7
Площадь шлейфа, км ²	540	565	555

230 мг/л, т.е. возрастает на 7 %. Из всех притоков наибольший вклад в формирование общей минерализации вод Куйбышевского водохранилища вносит р. Вятка. В 10 км ниже от места впадения р. Вятки в водохранилище общая минерализация вод возрастает с 215 мг/л до 255 мг/л (на 19 %). В целом, при суммарном воздействии рассматриваемых притоков по всей длине Куйбышевского водохранилища величина минерализации вод в период летней межени возрастает с 215 мг/л до 250 мг/л (на 14 %).

На рис. 4 (см. вклейку) приведены карты рассчитанной мутности воды Куйбышевского водохранилища для периода летней межени. В период межени значения мутности воды не превышает 20 г/м³, причем наибольшие значения мутности приходятся на относительно мелководные северные области водохранилища. Глубоководные центральная и южная части водохранилища характеризуются относительно небольшими значениями мутности — от 7 до 10 г/м³.

На рис. 5 (см. вклейку) представлены результаты расчетов удельного расхода наносов (г/с·м²) в меженный период при ветрах указанных направлений. Здесь ветер северного направления способствует более интенсивному перемешиванию акватории в ее центральной и северной части. Значения удельного расхода наносов превышают 2 г/с·м². Для ветра юго-западного направления наибольшие значения приходятся на плёсовые расширения в центральной части водохранилища, тогда как в южной части значения удельного расхода наносов в среднем составляет около 0.5 г/с·м².

5. Заключение

На основе системы уравнений «мелкой воды», модели конвективно-диффузионного переноса растворенного вещества, а также аналитических формул для расчета общего расхода наносов и мутности воды разработана модель массопереноса растворенных веществ в Куйбышевском водохранилище — крупнейшего водохранилища Волжского каскада. Оценка параметров модели выполнена с применением данных натурных изменений в пунктах мониторинга. Создана подробная цифровая модель ложа водохранилища. Выполнены имитационные расчеты ветровых и стоковых течений, распространения растворенных примесей (на примере общей минерализации), а также расхода взвешенных наносов и мутности потока в акватории водохранилища.

Моделирование пространственной структуры течений в Куйбышевском водохранилище показывает наличие устойчивых циркуляционных образований, обусловленных главным образом морфометрией ложа, направленностью и активностью ветров. Установлены скорости и масштабы таких течений в разных районах водохранилища.

Показано, что воды рек Мёши и Черемшана, распространяясь в плёсовых расширениях самостоятельным потоком, занимают обширную площадь акватории водохранилища (264–565 км²) и имеют значительную протяженность (51–94 км). Формирование пространственной конфигурации шлейфов речных вод в плёсовых районах водохранилища определяется скоростью и направленностью циркуляционных ветровых течений.

В районах русловых участков водохранилища при наличии преобладающего стокового течения смешение вод происходит более интенсивно, чем в плёсовых участках. Для рек Свияги и Казанки длина участка смешения составляет 35 км, а для р. Вятка — 10 км.

Рассчитанная на модели пространственная структура вод Куйбышевского водохранилища показывает наличие локальных зон с ярко выраженной неоднородностью вод. В зонах полного смешения речных вод с основной водной массой общая минерализация в водохранилище возрастает на 7–19 %, в результате чего суммарное увеличение минерализации по длине водохранилища достигает 14 %. Интенсивность и траектория распространения речных водных масс, несущих основную антропогенную нагрузку через границы боковых притоков, зависят как от наличия ветровой циркуляции течений, так и от режима стока на водохранилище. Все это приводит к неравномерному распределению мутности воды и удельного расхода наносов по акватории. Значения концентрации взвешенных веществ в северных и южных частях водохранилища меняются в интервале 11–17 мг/л. При этом значения удельного расхода наносов в акватории при сильных ветрах возрастают более чем на порядок.

Выбранный пространственный шаг сетки 200 м позволил достаточно подробно отобразить в модели ярко выраженную изрезанность береговой линии и неоднородный рельеф дна Куйбышевского водохранилища в его плёсовых расширениях, обширных заливах и русловых (речных) участках. В результате были получены разномасштабные циркуляции дрейфовых течений на всей акватории Куйбышевского водохранилища, поля общей минерализации, мутности и транспорта наносов с высокой детализацией. С другой стороны, модель вполне устойчива и позволяет проводить расчеты неравномерного и неустановившегося движения воды на сложных и неоднородных морфометрических участках водохранилища.

6. Финансирование

Работа выполнена при финансовом обеспечении за счет средств федерального бюджета в рамках темы № 0154–2019–0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов» и темы № АААА-А17-117112040039-7 «Разработка системы управления антропогенным эвтрофированием водохранилищ Средней и Нижней Волги».

Литература

1. Широков В.М. Режим прозрачности и мутности воды Куйбышевского водохранилища // Сборник работ Комсомольской гидрометеорологической обсерватории. Вып. II. 1962. С. 173–199.
2. Чигиринский П.Ф. О течениях в Куйбышевском водохранилище на основании четырехлетних наблюдений // Сборник работ Комсомольской гидрометеорологической обсерватории. Вып. II. 1962. С. 200–233.
3. Поддубный С.А. О генерации мезомасштабных вихрей на участке русло-затопленная пойма в северной части Куйбышевского водохранилища // Биология внутренних вод: информационный бюллетень. 1991. № 90. С. 92–96.
4. Ивлентиев В.С., Козина Л.Н. Математическое моделирование гидродинамики Волжского каскада гидросооружений // Вестник НГИЭИ. 2015. № 6 (49). С. 44–48.
5. Даценко Ю.С. Модельный расчет реакции Куйбышевского водохранилища на точечные загрязнения // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 3-х т. 2019. С. 59–63.
6. Пуклаков В.В., Даценко Ю.С. Моделирование гидрологического режима Куйбышевского водохранилища // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 3-х т. 2019. С. 160–166.
7. Рахуба А.В., Шмакова М.В. Математическое моделирование динамики заиления как фактора эвтрофирования водных масс Куйбышевского водохранилища // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, № 4. С. 189–193.
8. Рахуба А.В. Пространственно-временная изменчивость качества вод Саратовского водохранилища в условиях неустойчивого гидродинамического режима: натурные эксперименты и численное моделирование. Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: ФГУП РосНИИВХ, 2007. 188 с.
9. Рахуба А.В. Опыт использования измерительно-вычислительной системы «Хитон-Волна» в гидроэкологических исследованиях прибрежной акватории г. Тольятти // Экологические проблемы промышленных городов. Сборник 8-й Международной научно-практической конференции. Саратов, 2017. С. 484–488.
10. Рахуба А.В., Шмакова М.В. Численное моделирование заиления приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища речными наносами // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 35–48.
11. Шмакова М.В. Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ. СПб.: Издательство ВВМ, 2018. 149 с.
12. Wu Weiming. Computational River Dynamics. CRC Press, 2007. 509 p.
13. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики: учеб. пособие. М.: Наука, 1989. 608 с.
14. Вольцингер Н.Е., Пяковский Р.В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы. Л.: Гидрометиздат, 1977. 207 с.
15. Куйбышевское водохранилище / Ред. Монаков А.В. Л.: Наука, 1983. 213 с.
16. Материалы наблюдений на водохранилищах (Дополнение к Гидрологическому ежегоднику) / Под ред. А.Ф. Троицкой. Куйбышев: Приволжское УГМС, 1972. Т. 4, вып. 4, 8. 270 с.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 12, вып. 1 / Под ред. Г.Г. Доброумовой, О.Н. Потаповой, Т.С. Шмидт. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 412 с.
18. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Куйбышевское и Саратовское водохранилища / Под ред. В.А. Знаменского и П.Ф. Чигиринского. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 269 с.
19. Поддубный С.А. Гидрологические условия формирования и повышения биологической продуктивности экосистем Волжских водохранилищ. Автореф. дис... д-ра геогр. наук. М., 2000. 41 с.

References

1. Shirokov V.M. Regime of transparency and turbidity of water in the Kuibyshev Reservoir. *Sbornik Rabot Komsomol'skoj Gidrometeorologicheskoy Observatorii*. 1962, II, 73–199 (in Russian).
2. Chigirinsky P.F. About currents in the Kuibyshev Reservoir based on Four-year observations. *Sbornik Rabot Komsomol'skoj Gidrometeorologicheskoy Observatorii*. 1962, II, 200–233 (in Russian).

3. Poddubny S.A. About the generation of mesoscale vortices in the channel-flooded floodplain section in the Northern part of the Kuibyshev Reservoir. *Biologiya Vnutrennih Vod: Informacionnyj Byulleten'*. 1991, 90, 92–96 (in Russian).
4. Islentiev V.S., Kozina L.N. Mathematical modeling of the hydrodynamics of the Volga cascade of hydraulic structures. *Vestnik NGIEI*. 2015, 6 (49), 44–48 (in Russian).
5. Datsenko Yu.S. Model calculation of the reaction of the Kuibyshev Reservoir to point pollution. *Sovremennye Problemy Vodohranilishch i ih Vodosborov*. 2019, 59–63 (in Russian).
6. Puklakov V.V., Datsenko Yu.S. modeling of the hydrological regime of the Kuibyshev Reservoir. *Sovremennye Problemy Vodohranilishch i ih Vodosborov*. 2019, 160–166 (in Russian).
7. Rakhuba A.V., Shmakova M.V. Mathematical modelling of dynamics of sedimentation as a factor in eutrophication of the water mass of Kuibyshev Reservoir. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Centra Rossijskoj Akademii Nauk*. 2015, 17, 4, 89–193 (in Russian).
8. Rakhuba A.V. Spatial-temporal variability of the water quality of the Saratov Reservoir under conditions of an unsteady hydrodynamic regime: field experiments and numerical modeling. *Cand. Tehn. Sci. Diss. Ekaterinburg*, 2007. 188 p. (in Russian).
9. Rakhuba A.V. Experience in using the “Hiton-Volna” measuring and computing system in hydroecological studies of the coastal waters of Tolyatti. In the collection: Environmental problems of industrial cities. Collection of the 8th International scientific and practical conference. *Saratov, Izd-vo SGTU*, 2017, 484–488 (in Russian).
10. Rakhuba A.V., Shmakova M.V. Numerical simulation of siltation of the Kuibyshev Reservoir's floodplain by river sediments. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2018, 1, 35–48 (in Russian).
11. Shmakova M.V. Calculations of solid river flow and siltation of reservoirs. *SPb, Izdatel'stvo VVM*, 2018. 149 p. (in Russian).
12. Wu Weiming. Computational river dynamics. *CRC Press*, 2007. 509 p.
13. Marchuk G.I. Methods of computational mathematics. *Moscow, Nauka*, 1989. 608 p. (in Russian).
14. Voltzinger N.E., Pyaskovsky R.V. Theory of shallow water. Oceanological problems and numerical methods. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1977. 207 p. (in Russian).
15. Kuibyshev Reservoir / Ed. Monakov A.V. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1983. 213 p. (in Russian).
16. Materials of observations on reservoirs / Ed. A.F. Troitskaya. *Kuibyshev, Privolzhskoe UGMS*, 4, 4 and 8, 1972. 270 p. (in Russian).
17. Surface water resources of the USSR / Eds. G.G. Dobroumova, O.N. Potapova, T.C. Shmidt. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 12, 1, 1971. 412 p. (in Russian).
18. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR: Kuibyshev and Saratov Reservoirs. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1978. 269 p. (in Russian).
19. Poddubny S.A. Hydrological conditions for the formation and increase of biological productivity of ecosystems of the Volga reservoirs. Author's abstract. dis ... Dr. Geogr. Sciences. M., 2000. 41 p. (in Russian).

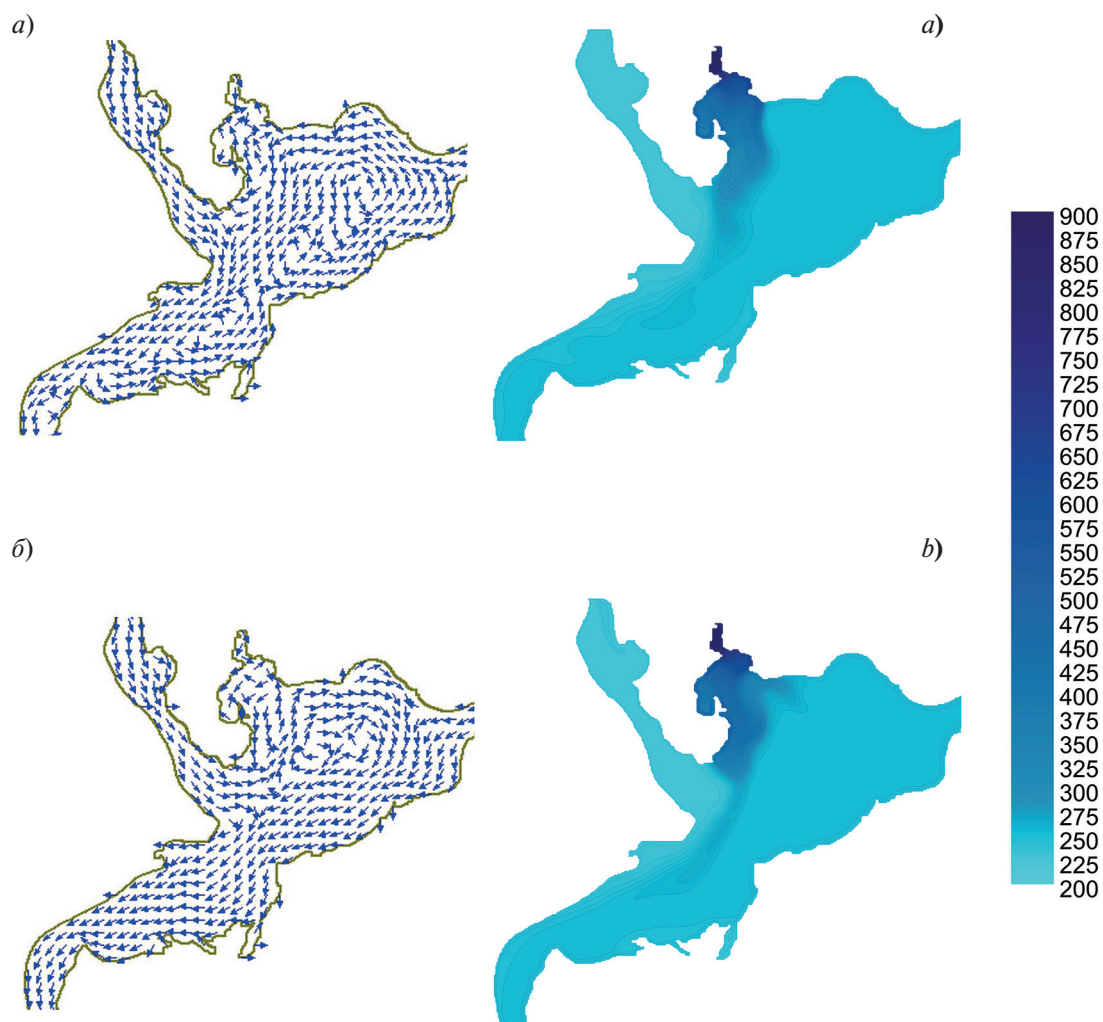


Рис. 1. Траектория течений и распределение шлейфа минерализации вод (г/м^3) р. Меша в Куйбышевском водохранилище: *a* — при юго-западном ветре, *б* — при северном ветре.

Fig. 1. Flow trajectory and distribution of the water salinity plume (g/m^3) of the Mesha River in the Kuibyshev reservoir: *a* — with a South-westerly wind, *b* — with a northerly wind.

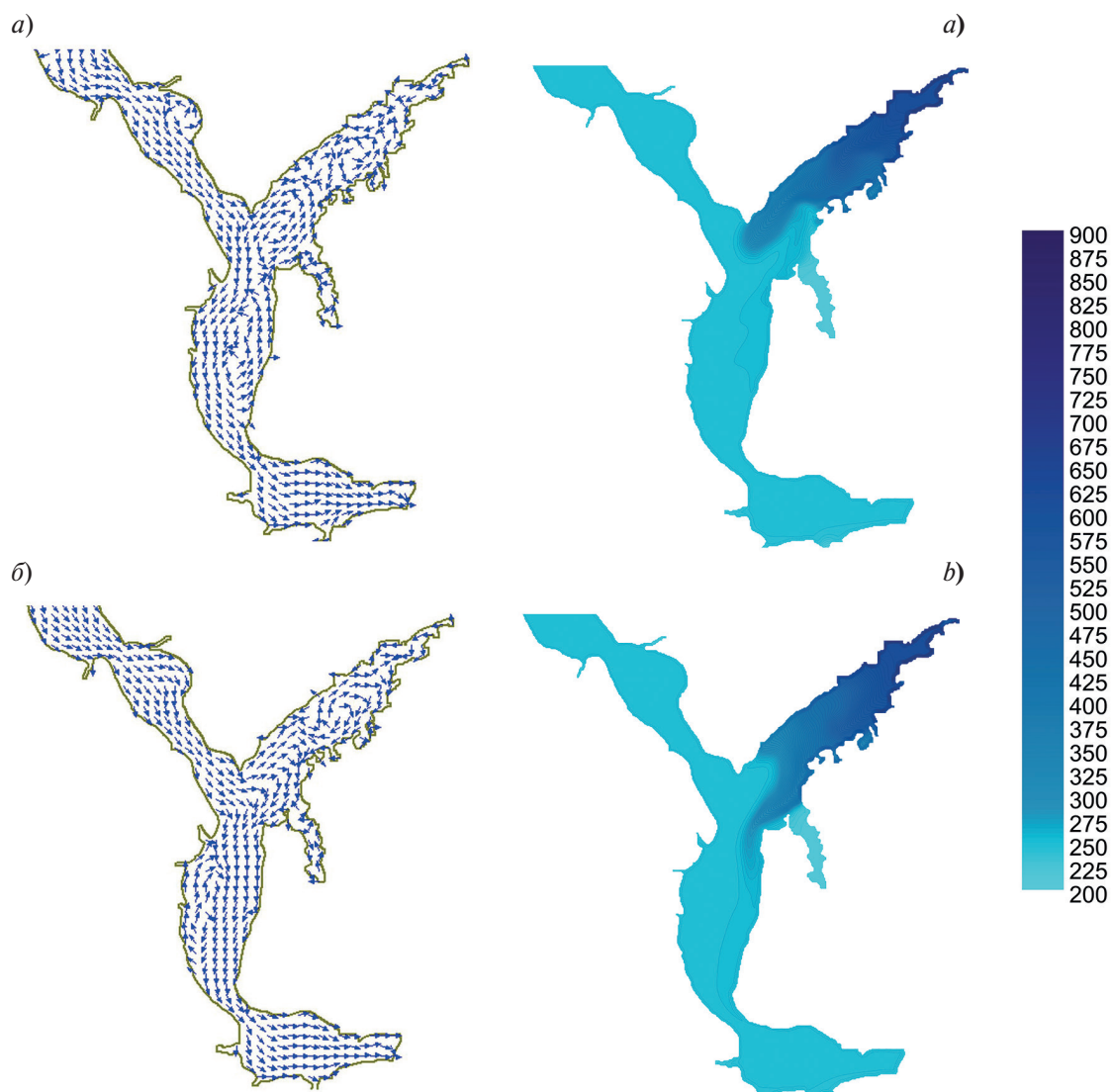


Рис. 2. Траектория течений и распределение шлейфа минерализации вод (г/м^3) р. Черемшан в Куйбышевском водохранилище: *a* — при юго-западном ветре, *б* — при северном ветре.

Fig. 2. Flow trajectory and distribution of the water salinity plume (g/m^3) of the Cheremshan River in the Kuibyshev reservoir: *a* — with a South-westerly wind, *b* — with a northerly wind.

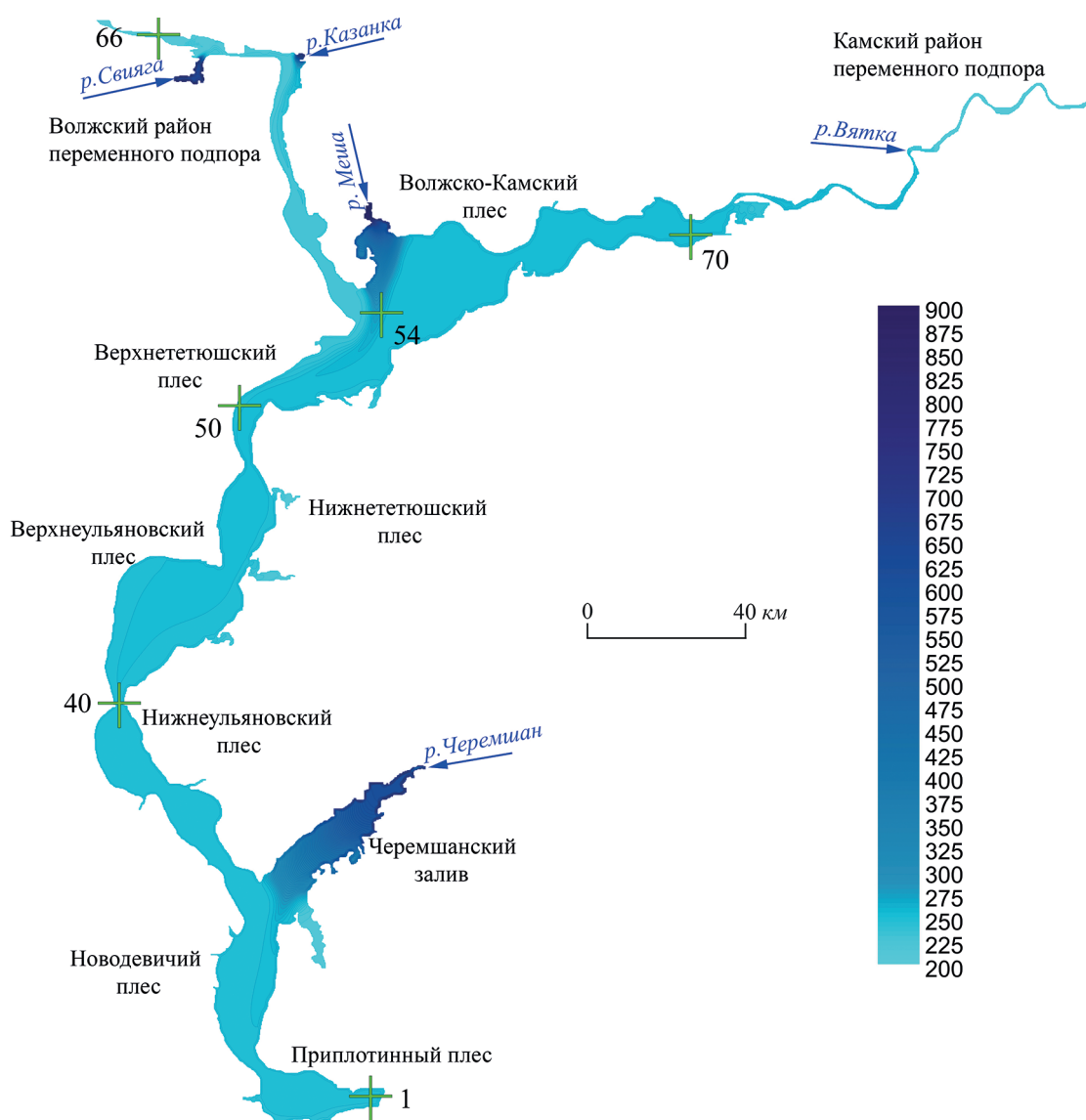


Рис. 3. Распределение минерализации воды (г/м^3) в Куйбышевском водохранилище при отсутствии ветра и расположение вертикалей наблюдений (+).

Fig. 3. Distribution of water salinity (g/m^3) in the Kuibyshev reservoir in the absence of wind and location of observation verticals (+).

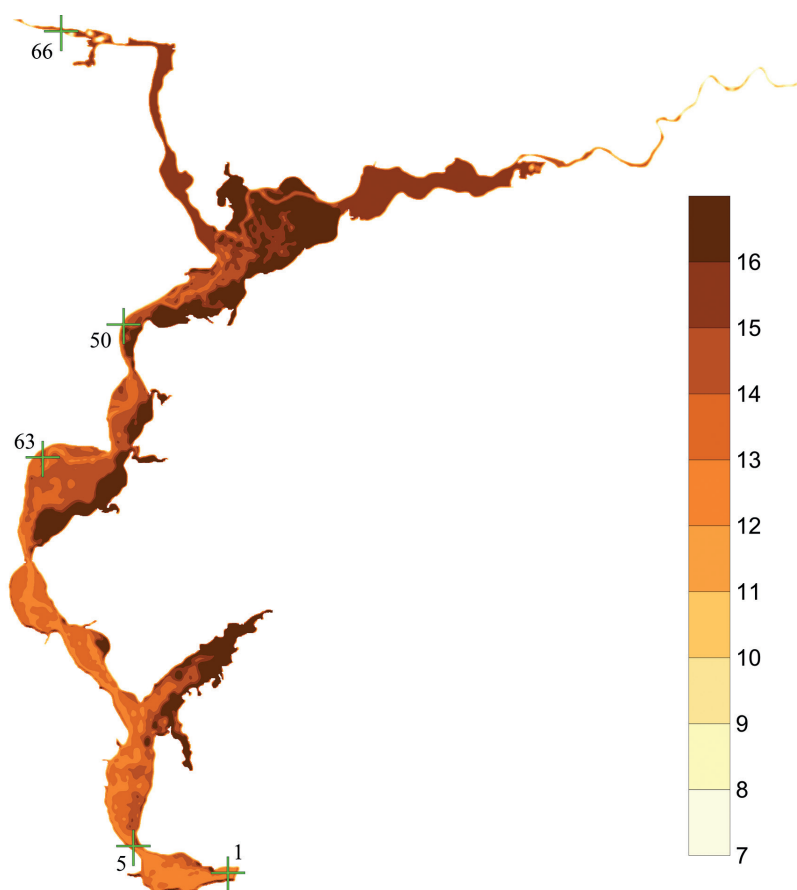


Рис. 4. Распределение мутности воды (г/м^3) в Куйбышевском водохранилище в период летней межени и расположение вертикалей наблюдений (+).

Fig. 4. Distribution of water turbidity (g/m^3) in the Kuibyshev reservoir during the summer low-water period and location of observation verticals (+).

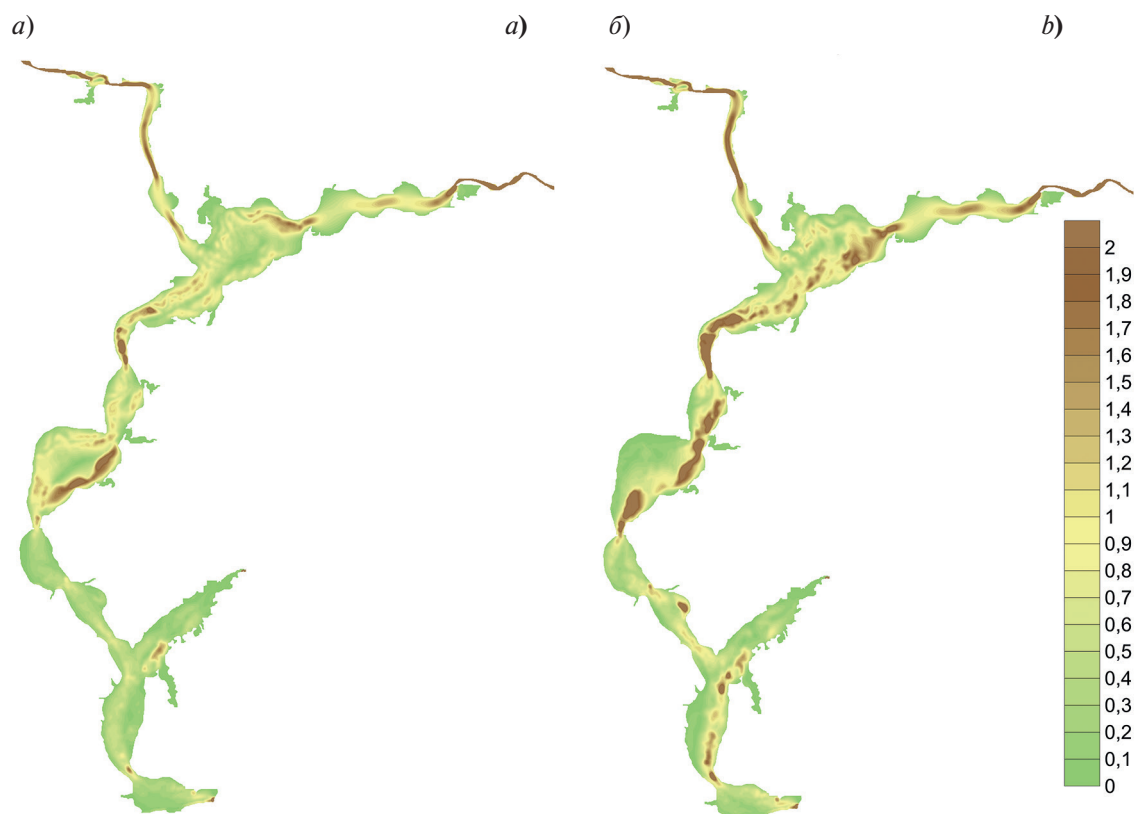


Рис. 5. Распределение удельного расхода наносов ($\text{г}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$) в Куйбышевском водохранилище в период летней межени при юго-западном ветре (a) и северном ветре (б).

Fig. 5. Distribution of specific sediment flow ($\text{g}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$) in the Kuibyshev reservoir during the summer autumn with a South-westerly wind (a) and North wind (b).