

Раздел 3

ГИДРОЛОГИЯ. КЛИМАТ

Section 3

HYDROLOGY. CLIMATE

УДК 556.161

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ РЕКИ ОБЬ В РАЙОНЕ ГОРОДА БАРНАУЛА

А.В. Кудишин, О.В. Ловцкая

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,

E-mail: kudishin@iwep.ru, lov@iwep.ru

Для участка р. Обь разработана и численно реализована компьютерная модель качества воды на основе математической модели эвтрофикационного блока системы WASP5. Модель описывает процесс очищения воды от органического загрязнения, динамику концентрации фитопланктона и растворенного кислорода, круговорот биогенных веществ и продуктов жизнедеятельности живых организмов, а также процессы массообмена с донными отложениями. Для параметров течения в реке использовались уравнения Сен-Венана в 1-D постановке. Модель опробована на 40-километровом участке реки Обь в районе г. Барнаула. Для оценки масштабов возможных изменений качества воды проведены расчеты на 300-километровом участке р. Обь. Результаты расчетов показали, что поступление биогенных и органических веществ с городских территорий, очистных сооружений и промышленных предприятий оказывает незначительное влияние на загрязнение р. Обь.

Ключевые слова: эвтрофикационная модель качества воды; р. Обь; р. Барнаул; WASP5; биогенные загрязнители.

DOI: 10.24412/2410-1192-2023-16803

Дата поступления: 11.02.2023. Принята к печати: 27.02.2023

Сбросы загрязняющих веществ в водные объекты вследствие хозяйственной деятельности человека вызывают ухудшение качества воды в поверхностных источниках водоснабжения. Для

обеспечения контроля качества воды требуется система мониторинга и анализа данных натурных наблюдений за гидрохимическим составом речных вод, возможности которой в нашей стране

ограничены вследствие крайне редкой сети станций, выполняющих гидрохимические наблюдения, устаревших методик химического анализа и малого набора наблюдаемых показателей [Безматерных и др., 2020]. В этой ситуации повышается значение использования физико-математических моделей качества воды, которые позволяют с достаточной степенью достоверности оценивать антропогенную нагрузку на водные объекты.

Эвтрофикационные модели описывают разложение органического загрязнения при потреблении растворенного кислорода, изменение концентрации кислорода, развитие фитопланктона и круговорот биогенных веществ. Учет жизнедеятельности фитопланктона необходим для моделирования концентрации определяющих биогенных веществ (аммонийный, нитратный, нитритный азот, минеральный фосфор), относящихся к приоритетным загрязнителям. Поэтому, именно такие модели следует использовать при оценке влияния поступления биогенных и органических веществ с городских очистных сооружений, промышленных предприятий, а также их смыв с городских и сельскохозяйственных территорий. Одной из распространенных и широко используемых моделей этого типа является модель WASP [Ambrose и др., 1991] (эвтрофикационный блок). В статье приводятся

результаты использования математического аппарата этой модели применительно к участку реки Обь в районе крупного административного и промышленного центра – г. Барнаула.

Материалы и методы

Город Барнаул расположен на левом берегу р. Обь в ее верхнем течении. Особенности рельефа городской территории таковы, что поверхностный сток, как организованный (через систему уличной ливневой канализации), так и неорганизованный, поступает в основном в реку Барнаулку или в ее приток – реку Пивоварку. Таким образом, река Барнаулка является своего рода концентратором и транспортером в реку Обь загрязнений с городской территории [Дрюпина и др., 2014].

Моделируемый участок реки Обь длиной 40 км, включающий в себя устье р. Барнаулки, представлен на рисунке 1. В результате проведенных экспедиционных гидрологических и гидрохимических исследований на этом участке получены натурные данные для калибровки и верификации математической и компьютерной моделей качества воды [Отчет..., 2018]. Для оценки изменения концентраций загрязняющих веществ в различные фазы водного режима 2018 г. отобраны пробы воды в реках Барнаулка и Обь. При построении гидравлической модели русла р. Обь использованы данные

натурных измерений геометрии русла; расход воды определялся по данным гидрологического поста Барнаул. Наблюдения за уровнем воды проводились на двух временных водомерных постах, специально организованных для этих целей (рис.1) [Отчет..., 2018].

При построении физико-математической модели качества воды использовался эвтрофикационный блок модели качества воды в реках WASP [Ambrose и др., 1991] и одномерные нестационарные

уравнения конвективной диффузии [Handbook...,1992], описывающие перенос примеси в реке. Модель WASP предложена Американским агентством по охране окружающей среды (US EPA) и является широко используемой основой для разработки моделей, специфичных для конкретного объекта, для моделирования концентраций загрязняющих веществ в поверхностных водах и донных отложениях в различных временных и пространственных масштабах.

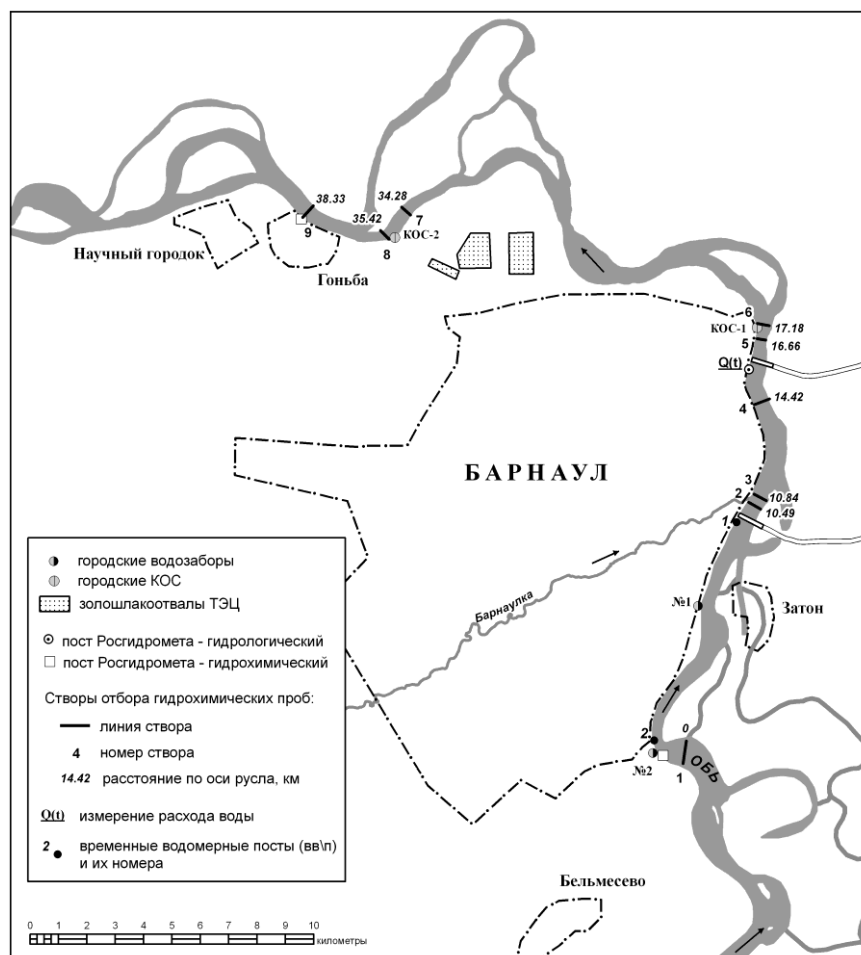


Рис. 1. Схема замеров гидрологических и гидрохимических параметров в р. Обь в районе г. Барнаула (картосхема подготовлена К.В. Марусиным [Отчет..., 2018])
 Fig. 1. Schematic map of measurements of hydrological/hydrochemical parameters in the Ob River near Barnaul (K.V. Marusin [Report..., 2018])

Реализованная авторами модель описывает процесс очищения воды от органического загрязнения, динамику концентрации фитопланктона и растворенного кислорода, круговорот биогенных веществ и продуктов жизнедеятельности живых организмов, а также процессы массообмена с донными отложениями.

Для параметров течения в реке использовались уравнения Сен-Венана в 1-D постановке [Стокер, 1959]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Q u) + g \omega \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q |Q|}{K^2} \right) = 0, \quad (2)$$

где T – температура воды; T_{pr} – температура притока, $c_p = 1$ – удельная теплоемкость воды, ккал/(кг·°C); $\rho = 1000$ – плотность воды, кг/м³; $E = E(n_r, u, R_h)$ – коэффициент продольной дисперсии, м²/с; Ψ_{w-a} – тепловой поток через свободную поверхность воды, ккал/(м²·с), определяемый по методике Харлемана [Rayan и др., 1974].

Математической основой большинства моделей качества воды являются уравнения переноса примесей, к которым добавлены члены, описывающие

здесь ω – площадь живого сечения русла, м²; Q – расход воды, м³/с; z – уровень свободной поверхности воды, м; q – боковой приток на единицу длины, м²/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; t – время, с; x – координата вдоль оси русла, м; $u = Q/\omega$ – скорость течения; $K = \omega C \sqrt{R_h}$ – модуль расхода, C – коэффициент Шези, R_h – гидравлический радиус, м.

Температура воды в реке рассчитывалась с использованием уравнения:

$$\frac{\partial(\omega T)}{\partial t} + \frac{\partial(Q T)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(E \omega \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{1}{c_p \rho} * B * \Psi_{w-a} + q * T_{pr}, \quad (3)$$

изменение концентрации веществ за счет протекающих в воде биохимических реакций, взаимодействия со взвешенными наносами, донными отложениями и атмосферой, их поступление со сточными водами и притоками, убывание вследствие забора и оттока воды и так далее. Соответствующее одномерное уравнение для реки выглядит следующим образом (см., напр. [Стокер, 1959; Воеводин, Никифоровская, 1978; Somlyody, Varis, 1992; Vasiliev, 1979]):

$$\frac{\partial(\omega C_k)}{\partial t} + \frac{\partial(Q C_k)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(E \omega \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) = \omega F_k + q * C_{k pr}; \quad (4)$$

где C_k – концентрации примеси « k », г/м³ (мг/л); $C_{k pr}$ – концентрация примеси « k » в воде притоков, г/м³; F_k – член, описывающий скорость изменения концентрации

примесей вследствие биохимических реакций, взаимодействия с донными отложениями и атмосферой и другими процессами, не связанными с переносом вдоль

течения реки и поступлением с притоками и с берегов, г/(м³·сут.).

Модель использует 8 переменных: концентрации растворенного кислорода, фитопланктона, минерального фосфора, минерального азота в аммонийной и нитратной формах, органического азота и фосфора, органического углерода, определяемого по БПК₅ [Семчуков, 2013]:

C_1 – концентрация аммонийного азота;
 C_2 – концентрация нитратного азота;
 C_3 – концентрация минерального фосфора;

C_4 – концентрация фитопланктона в углеродных единицах;

C_5 – концентрация органического углерода, определяемого по БПК₅;

C_6 – концентрация растворенного кислорода;

C_7 – концентрация органического азота;

C_8 – концентрация органического фосфора.

Для уравнений (1–4) устанавливаются начальные условия:

$$\begin{aligned} Q_{(t=0,x)} &= Q_{0(x)}, \quad z_{(t=0,x)} = z_{0(x)}, \quad T_{(t=0,x)} = T_{0(x)}, \\ C_{k(t=0,x)} &= C_{k0(x)}, \quad k = 1.8 \end{aligned} \quad (5)$$

И граничные условия:

$$\begin{aligned} Q_{(t,x=Xin)} &= Q_{in(t)}, \quad z_{(t,x=Xout)} = z_{out(t)}, \\ T_{(t,x=Xin)} &= T_{in(t)}, \quad C_{k(t,x=Xin)} = C_{kin(t)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\partial T / \partial x |_{x=x_{out}} = 0, \quad \partial C_k / \partial x |_{x=x_{out}} = 0 \quad (7)$$

Результаты апробации модели качества воды на исследуемом участке реки Обь в районе г. Барнаула

Пробы воды для химического анализа отобраны в 9 створах, в каждом створе в 3 точках: левый берег, середина реки, правый берег (рис. 1). Данные по химическому составу речной воды в устье р. Барнаулки учитывались как данные притока. В качестве граничных условий (6) использованы данные натурных измерений в начальном створе рассматриваемого участка реки. Расход р. Барнаулки принят равным 6 м³/с.

Расход р. Обь принят равным 4485 м³/с. Апробация гидравлической модели (1, 2) показала хорошее совпадение рассчитанных и измеренных уровней воды (рис.2).

На рассматриваемом участке длиной 40 км рассчитанные изменения значений показателей качества воды незначительны, что иллюстрируют графики на рисунках 3а–3д. Устье р. Барнаулки соответствует створу (точке) 3, КОС-1 соответствует точкам 5–6, КОС-2 – точкам 7–8.

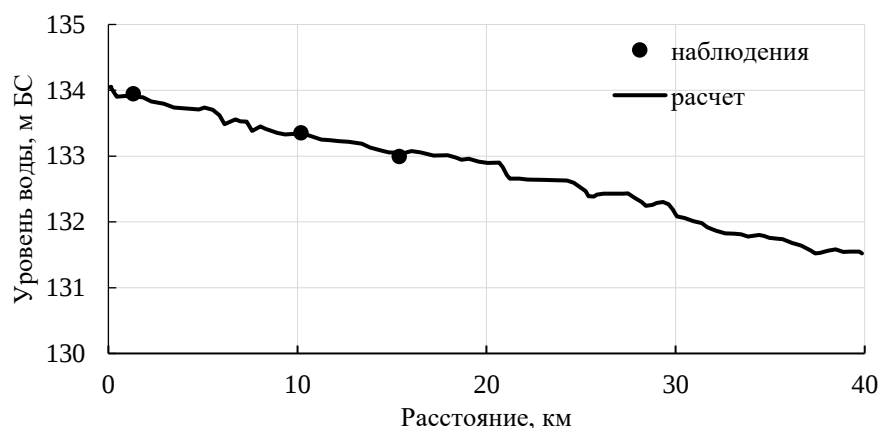


Рис. 2. График уровней воды р. Обь в районе г. Барнаула
Fig. 2. Graph of the Ob water levels near Barnaul

Очевидны существенные расхождения рассчитанных и измеренных значений концентраций веществ на участке впадения р. Барнаулки. Одна из причин – одномерная постановка задачи, в рамках которой в качестве расчетной величины используется осредненное по поперечному сечению реки значение концентрации и предположение о мгновенном перемешивании притока с основным речным потоком. Поскольку в нашем случае расход притока много меньше расхода р. Обь ($6 \text{ м}^3/\text{с}$ и $4485 \text{ м}^3/\text{с}$), изменения концентраций, рассчитанных по модели, очень малы и могут стать значительными в случае увеличении расхода р. Барнаулки (или загрязнений) на порядок. В реальности поля концентраций существенно трехмерны и не будут совпадать со средними по поперечному сечению значениями. Этот факт иллюстрируется и приведенными рисунками, на которых замеренные

значения в створе (1–левый берег, 2–середина реки, 3–правый берег) существенно различны. Также возможно наличие неучтенной боковой приточности. Одномерные модели оправданы для участков длиной десятки и сотни километров. Это иллюстрируют сами графики: скачок измеренных значений на 10 км; возвращение к начальным значениям на 15–20 км. Вторая причина – влияние неучтенных факторов на результаты измерений, обсуждение которых выходит за рамки данной статьи.

Для оценки масштабов возможных изменений проведены расчеты на 300-километровом участке р. Обь (рисунки 4а–4д). Значимые изменения показателей без учета боковой приточности происходят для:

- БПК₅ – на расстоянии 100 км;
- NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} – на расстоянии 200–300 км.

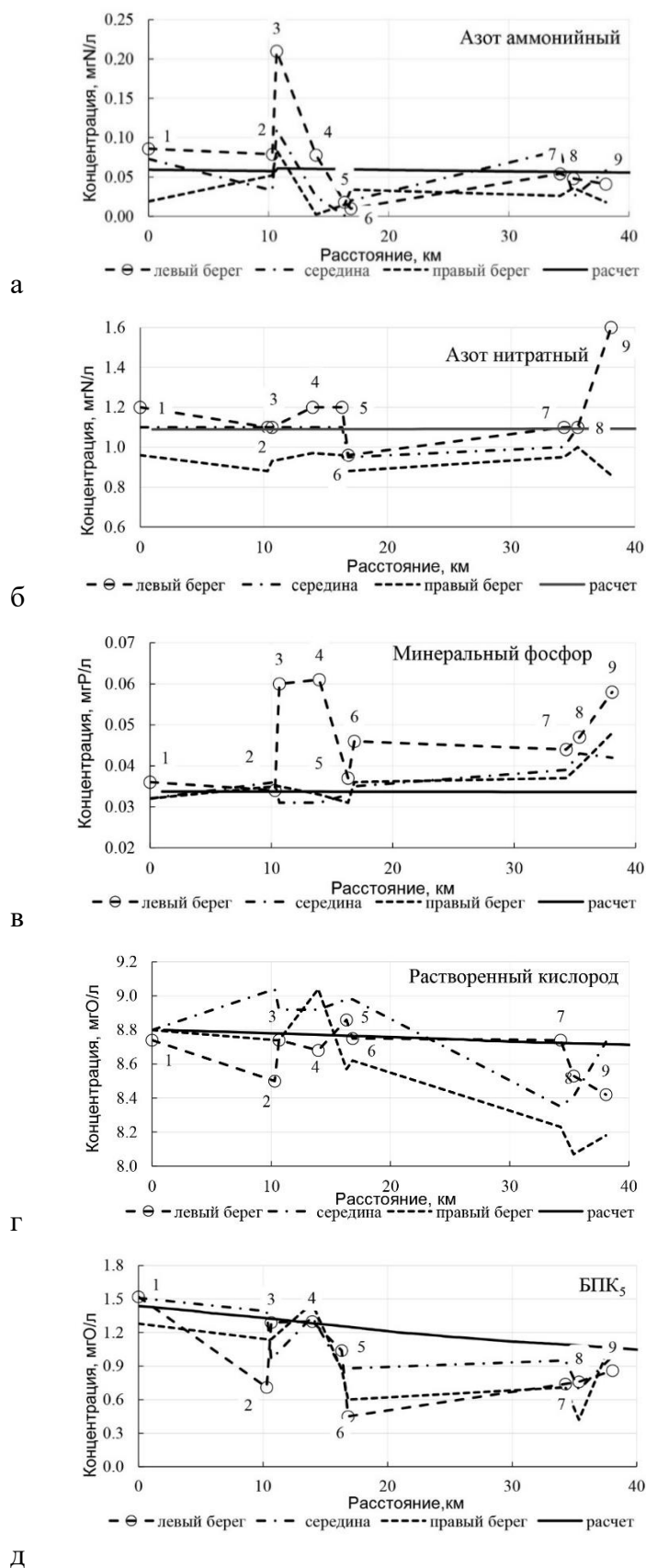


Рис. 3. Графики изменения значений показателей качества вдоль реки (длина участка 40 км).

Примечание: Цифрами обозначены точки отбора проб в соответствии с рис. 1
 Fig. 3. Graphs of changes in quality indicators along the river (section length: 40 km).
 Note: The numbers indicate sampling points in accordance with Fig. 1

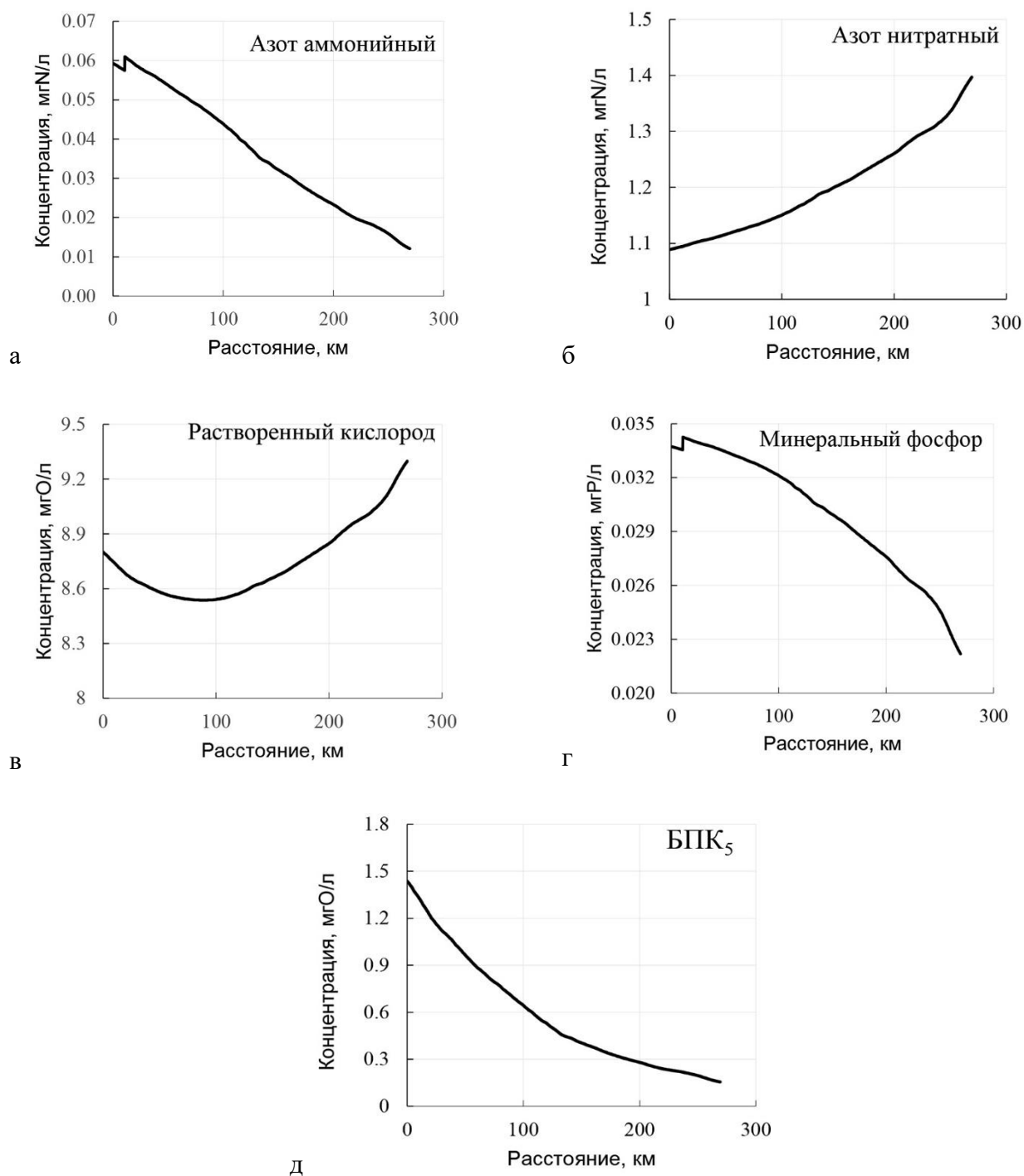


Рис. 4. Графики изменения значений показателей качества вдоль реки (длина участка 300 км)
Fig. 4. Graphs of changes in quality indicators along the river (section length: 300 km)

В целом, рисунки 4а – 4д демонстрируют слабое изменение показателей качества воды вдоль реки, что говорит о медленном взаимодействии между собой рассмотренных химических

компонентов. Можно предположить, что распределенная боковая приточность является в рассмотренных условиях определяющей в изменении значений показателей качества воды.

Заключение

Разработана и апробирована модель качества воды на участке реки Обь в районе крупного административного и промышленного центра – г. Барнаула. Результаты расчетов показали, что поступление биогенных и органических веществ с городских территорий, очистных сооружений и промышленных

предприятий оказывает незначительное влияние на загрязнение р. Обь по ряду параметров. В целом показано, что в масштабе всего исследуемого участка рассмотренная компьютерная модель позволяет получать оценку качества воды и прогнозировать распространение загрязнения вдоль русла реки в результате антропогенного воздействия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of Interest. The authors declare that they has no competing interests.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий»).

Список литературы

Безматерных Д.М., Пузанов А.В., Папина Т.С. и др. Перспективы совершенствования технологии экологического мониторинга поверхностных вод Обь-Иртышского бассейна // Известия АО РГО. 2020. № 2(57). С. 49–58. doi: 10.24411/2410-1192-2020-15704

Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С. Математическое моделирование характеристик качества воды в системах открытых русел // Сборник докладов симпозиума по вопросам математического моделирования качества воды водоемов. М.: Издательство Секретариата СЭВ, 1978. С. 114–129.

Дрюпина Е.Ю., Эйрих А.Н., Эйрих С.С., Папина Т.С. Влияние крупных городов на качество речных вод (на примере р. Обь в районе г. Барнаула) // Вода: химия и экология. 2014. № 7(73). С. 3–9.

Отчет о научно-исследовательской работе по проекту «Разработка методов оценки диффузного стока с урбанизированных территорий путем решения обратных задач моделирования качества воды». Барнаул, ИВЭП СО РАН, 2018. Номер госрегистрации АААА-А18-118112390023-7.

Семчуков А.Н. Моделирование качества воды Новосибирского водохранилища. Часть 1. Описание модели // Мир науки, культуры, образования. 2013. № 2 (39). С. 317–322.

Стокер Дж. Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложения. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 617 с.

Ambrose R.D.Jr., Wool T.A. Martin J.L., Connolly J.P., Schanz R.W. WASP5.X. A Hydrodynamic and water quality model. Athens: EPA, 1991. 349 p.

Handbook of Hydrology / Eds. D.R. Maidment. New York: Mc GrowHill, 1992. 518 p.

Rayan R.J., Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D. Surface heat loss from cooling ponds // Water resources research. 1974. Vol. 10. no 5. P. 930–938.

Somlyódy L., Varis O. Water Quality Modeling of Rivers and Lakes. Laxenburg: IIASA, WP-92-41, 1992. 85 p.

Vasiliev O.F. Mathematical modeling of water quality in river channels and its systems. Laxenburg: IIASA, WP-79, 1979. 121 p.

References

Bezmaternykh D.M., Puzanov A.V., Papina T.S. et al. Perspektivy sovershenstvovaniya tekhnologii ekologicheskogo monitoringa poverkhnostnykh vod Ob'-Irtyskogo basseyna [Prospects for improving the technology of environmental monitoring of surface waters in the Ob-Irtys basin] // Izvestiya AO RGO [Bulletin AB RGS]. 2020. no. 2 (57). P. 49–58. (In Russian). doi: 10.24411/2410-1192-2020-15704

Voevodin A.F., Nikiforovskaya V.S. Matematicheskoe modelirovanie kharakteristik kachestva vody v sistemakh otkrytykh rusel [Mathematical modeling of water quality characteristics in open channel systems] // Sbornik dokladov simpoziuma po voprosam matematicheskogo modelirovaniya kachestva vody vodoemov [Proceedings of the symposium on mathematical modeling of water quality in reservoirs]. M.: Publishing House of the CMEA Secretariat, 1978. P. 114–129. (In Russian).

Dryupina E.Yu., Eirikh A.N., Eirikh S.S., Papina T.S. Vliyanie krupnykh gorodov na kachestvo rechnykh vod (na primere r. Ob' v rayone g. Barnaula) [Influence of large cities on river water quality (by the example of the Ob River near Barnaul)] // Voda: khimiya i ekologiya [Water: chemistry and ecology]. 2014. no. 7(73). P. 3–9. (In Russian).

Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote po projektu «Razrabotka metodov otsenki dif-fuznogo stoka s urbanizirovannykh territoriy putem resheniya obratnykh zadach modelirovaniya kachestva vody» [Report on research within the project "Development of methods for assessing non-point pollution by urban areas through solving inverse problems of water quality modeling"]. Barnaul, IWEP SB RAS, 2018. State registration: AAAA-A18-118112390023-7. (In Russian).

Semchukov A.N. Modelirovanie kachestva vody Novosibirskogo vodokhranilishcha. Chast' 1. Opisanie modeli. [The Novosibirsk reservoir water quality modeling. Part 1. Model description] // Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya [World of science, culture, education]. 2013. no. 2 (39). P. 317–322. (In Russian).

Stoker J.J. Volny na vode. Matematicheskaya teoriya i prilozheniya [Waves on the water. Mathematical theory and applications]. M.: Publishing House “Foreign Literature”, 1959. 617 p. (In Russian).

Ambrose R.D.Jr., Wool T.A. Martin J.L., Connolly J.P., Schanz R.W. WASP5.X. A Hydrodynamic and water quality model. Athens: EPA, 1991. 349 p.

Handbook of Hydrology / Eds. D.R. Maidment. New York: Mc GrowHill, 1992. 518 p.

Rayan R.J., Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D. Surface heat loss from cooling ponds // Water resources research. 1974. Vol. 10. no 5. P. 930–938.

Somlyódy L., Varis O. Water Quality Modeling of Rivers and Lakes. Laxenburg: IIASA, WP-92-41, 1992. 85 p.

Vasiliev O.F. Mathematical modeling of water quality in river channels and its systems. Laxenburg: IIASA, WP-79, 1979. 121 p.

MODELING OF THE OB WATER QUALITY AT THE CITY OF BARNaul

A.V. Kudishin, O.V. Lovtskaya

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul

E-mail: kudishin@iwep.ru, lov@iwep.ru

A computer model of water quality was developed and numerically implemented for the Ob section based on the eutrophication unit of the WASP5 water quality model. Our model describes the processes of water purification from organic pollution and mass transfer with bottom sediments, the dynamics of phytoplankton and dissolved oxygen concentrations as well as the circulation of nutrients and waste products of living organisms. For calculation of river flow parameters, the Saint-Venant equations in 1-D formulation were used. The model was tested on a 40-km section of the Ob River near Barnaul. To assess the scale of probable changes in water quality, the calculations were made for a 300-km section of the Ob, which showed an insignificant effect of biogenic and organic substances discharged from urban areas, treatment facilities and industrial enterprises on the Ob water pollution.

Keywords: eutrophication water quality model; Ob River; Barnaulka River; WASP5; biogenic pollutants.

Received February 11, 2023. Accepted: February 27, 2023

Сведения об авторах

Кудишин Алексей Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, Молодежная, д. 1, ИВЭП СО РАН. ORCID 0000-0002-5613-5778. E-mail: kudishin@iwep.ru.

Ловцкая Ольга Вольфовна – старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, Молодежная, д. 1, ИВЭП СО РАН. ORCID 0000-0002-3942-1350. E-mail: lov@iwep.ru.

Information about the authors

Kudishin Aleksey Vasil'evich – PhD in Physics and Mathematics, Senior researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID 0000-0002-5613-5778. E-mail: kudishin@iwep.ru.

Lovtskaya Olga Vol'fovna – Senior researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID 0000-0002-3942-1350. E-mail: lov@iwep.ru.