

- ника: методология, методы: материалы Школы по гидробиологии (п. Борок, 8-12 апр. 2003 г.). – Рыбинск, 2003.
6. Катанская, В.М. Методы изучения высшей водной растительности / В.М. Катанская, И.М. Распопов // Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. – Л., 1983.
 7. Галыгин, В.А. Динамика переработки берегов Белгородского и Старооскольского водохранилищ / В.А. Галыгин, Н.Н. Крамчанинов, А.Н. Петин // Научные ведомости. – 2012. – Вып. 18. – № 3 (122). – Сер. Естественные науки.

Bibliography

1. Razrabotka proekta pravil ispol'zovaniya Gilevskogo vodokhranil'isha na reke Aleyj. Provedenie akvatorial'nogo rayonirovaniya Gilevskogo vodokhranil'isha // Otchet OOO «Centr inzhenernykh tekhnologiy». – Barnaul, 2012.
2. Belavskaya, A.P. K metodike izucheniya vodnoy rastitel'nosti // Botanicheskiy zhurn. – 1979. – T. 64. – № 1.
3. Katanskaya, V.M. Vihsshaya vodnaya rastitel'nost' kontinentalnykh vodoemov SSSR. Metodicheskoye izucheniye / V.M. Katanskaya. – L., 1981.
4. Papchenkov, V.G. Rastitel'nyy pokrov vodoemov i vodotokov Srednego Povolzh'ya: Monografiya. – Yaroslavl, 2001.
5. Raspopov, I.M. Produktiya makrofitov vodoemov s zamedlennim vodoobmenom: osnovniye ponyatiya, metodicheskoye izucheniye // Gidrobiologiya: metodologiya, metodicheskoye izucheniye materialih Shkolih po gidrobiologii (p. Borok, 8-12 apr. 2003 g.). – Rybinsk, 2003.
6. Katanskaya, V.M. Metodicheskoye izucheniye vihsshey vodnoy rastitel'nosti / V.M. Katanskaya, I.M. Raspopov // Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnnykh otlozheniy. – L., 1983.
7. Galigin, V.A. Dinamika pererabotki beregov Belgorodskogo i Starooskol'skogo vodokhranil'ish / V.A. Galigin, N.N. Kramchaninov, A.N. Petin // Nauchniye vedomosti. – 2012. – Vyp. 18. – № 3 (122). – Ser. Estestvenniye nauki.

Статья поступила в редакцию 16.05.13

УДК 51-7:502.175

Semchukov A.N. THE NOVOSIBIRSK RESERVOIR WATER QUALITY MODELLING. PART 2. INPUT DATA GENERATION AND CALIBRATION RESULTS. Basing on field measurement for Novosibirsk reservoir the eutrophication unit of the WASP water quality model was calibrated. It describes the dynamics of phytoplankton and dissolved oxygen concentrations, nutrient cycle and self-purification of water body against organic pollution. The ways of farther development of the Novosibirsk reservoir water quality modeling were highlighted. The input data generation is described and the calibration results are given in the second part of the article.

Key words: water quality, mathematical modeling, Novosibirsk reservoir.

A.N. Семчуков. канд. физ.-мат. наук, н.с. Института водных и экологических проблем СО РАН,
E-mail: sasha@iwep.nsc.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ НОВОСИБИРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА. ЧАСТЬ 2. ФОРМИРОВАНИЕ ВХОДНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ

По результатам натурных наблюдений на Новосибирском водохранилище выполнена калибровка эвтрофикационного блока модели качества воды WASP, описывающего изменение концентрации фитопланктона и растворенного кислорода, круговорот биогенных веществ и самоочищение водоема от органического загрязнения. Намечены пути дальнейшего развития моделирования качества воды Новосибирского водохранилища. Во второй части статьи описывается формирование входных данных и приводятся результаты калибровки.

Ключевые слова: качество воды, математическое моделирование, Новосибирское водохранилище.

Данная работа посвящена результатам калибровки эвтрофикационного блока модели качества воды WASP5 [1] по результатам наблюдений, выполненных на Новосибирском водохранилище в 1981 г. Для этого года имеются наиболее подробные данные о гидрохимическом и гидробиологическом режиме водохранилища. В первой части статьи дано описание использовавшейся модели, во второй части приводится ее численная реализация, формирование входных данных для расчета и калибровки, представлены результаты калибровки модели, а также некоторые предположения по поводу дальнейшего развития моделирования качества воды в Новосибирском водохранилище.

Численная реализация

Расчеты выполнялись с помощью метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности с шагом в 1 сутки. При этом использовались среднемесячные значения входных данных: метеорологических элементов, интенсивности поступления примесей, расходов притоков, стока, температуры речной воды.

Значения метеорологических параметров, за исключением интенсивности атмосферных осадков, присваивались серединой месяцев и далее интерполировались линейно, при этом данные на начало и конец года определялись как среднее между таковыми для января и декабря. Остальные показатели задавались кусочно-постоянными.

В ходе вычислений расчетные значения концентраций некоторых веществ могут опуститься ниже нуля, что является противоестественным с физической точки зрения. В природе снижение концентраций может произойти, например, при бурном росте фитопланктона, когда израсходуются питательные веще-

ства. Коэффициенты G_N , P_1 и A , которые даны в уравнениях (4)-(11) в первой части статьи [2], являются функциями от соответствующих концентраций. При отрицательных расчетных концентрациях веществ они теряют свой физический смысл и могут способствовать «раскачиванию» численного решения около нулевых значений. Поэтому этим коэффициентам присваиваются те значения, которые они имели бы при нулевой концентрации, что стабилизирует численное решение. Альтернативным методом было бы простое присваивание концентрациям малых положительных значений, но это было признано нецелесообразным.

При одновременном сведении концентраций аммонийного и нитратного азота до нуля коэффициент P_1 становится неопределенным, однако в этом случае его значение не играет никакой роли, и он может быть приравнен любому числу. Также можно заметить, что в уравнениях (15) и (18), представленных в первой части статьи, удельные скорости дыхания R и денитрификации A_{20} не зависят от концентраций растворенного кислорода C_6 и БПК C_5 , что теоретически может привести к отрицательным значениям этих примесей. Поэтому при численной реализации модели в соответствующие уравнения были введены поправочные коэффициенты в виде функций Моно от показателей C_6 и C_5 . При этом коэффициенты полунасыщения имели величину меньшего порядка, чем характерные значения этих концентраций.

Параметры модели WASP

Обозначение	Размерность	Описание	Значение
K_{71}	1/сут.	максимальная удельная скорость минерализации органического азота при 20°C	0,075
K_{83}	1/сут.	максимальная удельная скорость минерализации органического фосфора при 20°C	0,22
K_{12}	1/сут.	максимальная удельная скорость нитрификации при 20°C	0,001
K_{20}	1/сут.	максимальная удельная скорость денитрификации при 20°C	0,09
K_{50}	1/сут.	максимальная удельная скорость окисления БПК при 20°C	0,21
K_{mpc}	мг/л	коэффициент полунасыщения по фитопланктону процесса минерализации органического азота и фосфора	1,0
K_{nit}	мг/л	коэффициент полунасыщения по кислороду процесса нитрификации	2,0
K_{NO_3}	мг/л	коэффициент полунасыщения по кислороду процесса денитрификации	0,1
K_{BOD}	мг/л	коэффициент полунасыщения по кислороду процесса окисления БПК	0,5
K_G	1/сут.	максимальная удельная скорость роста фитопланктона при 20°C	0,7
K_R	1/сут.	максимальная удельная скорость дыхания фитопланктона при 20°C	0,125
K_{mp}	мг/л	коэффициент полунасыщения фитопланктона по фосфору	0,001
K_{mn}	мг/л	коэффициент полунасыщения фитопланктона по азоту	0,025
K_{c0}	1/м	коэффициент ослабления света в чистой воде	1,0
K_c	м ² /г	коэффициент ослабления света фитопланктоном	0,283
I_s	ккал/(м ² ·ч)	радиация, при которой достигается максимальная интенсивность фотосинтеза	130,0
D	1/сут.	удельная скорость отмирания фитопланктона	0,02
θ_{71}	б/р	коэффициент температурной зависимости процесса минерализации органического азота	1,08
θ_{83}	б/р	коэффициент температурной зависимости процесса минерализации органического фосфора	1,08
θ_{12}	б/р	коэффициент температурной зависимости процесса нитрификации	1,08
θ_{20}	б/р	коэффициент температурной зависимости процесса денитрификации	1,045
θ_{50}	б/р	коэффициент температурной зависимости процесса окисления БПК	1,047
θ_G	б/р	коэффициент температурной зависимости скорости роста фитопланктона	1,068
θ_R	б/р	коэффициент температурной зависимости скорости дыхания фитопланктона	1,045
f_{on}	б/р	доля азота, выделяющаяся в органической форме в ходе жизнедеятельности фитопланктона	0,5
f_{op}	б/р	доля фосфора, выделяющаяся в органической форме в ходе жизнедеятельности фитопланктона	1,0
f_{d7}	б/р	доля органического азота, находящаяся в растворенном состоянии	1,0
f_{d8}	б/р	доля органического фосфора, находящаяся в растворенном состоянии	1,0
f_{d5}	б/р	доля БПК, находящаяся в растворенном состоянии	0,5
f_{d3}	б/р	доля минерального фосфора, находящаяся в растворенном состоянии	0,85
v_{s4}	м/сут	скорость осаднения фитопланктона	0,1
v_{s3}	м/сут	скорость осаднения взвешенных наносов	0,1
v_{s5}	м/сут	скорость осаднения мертвой органики	0,1

Формирование входных данных

Расчеты велись для всего календарного 1981 г., с 1 января (0 ч.) до 31 декабря (24 ч.). Для уровня и ледотермического режимов водохранилища учитывались два основных притока

(р. Обь и р. Бердь), так как остальные имеют несопоставимо меньший сток. При этом использовались среднемесячные данные по расходу и температуре воды р. Оби (г. Камень-на-Оби) и р. Берди (г. Искитим), а также Новосибирской ГЭС [3]. При от-

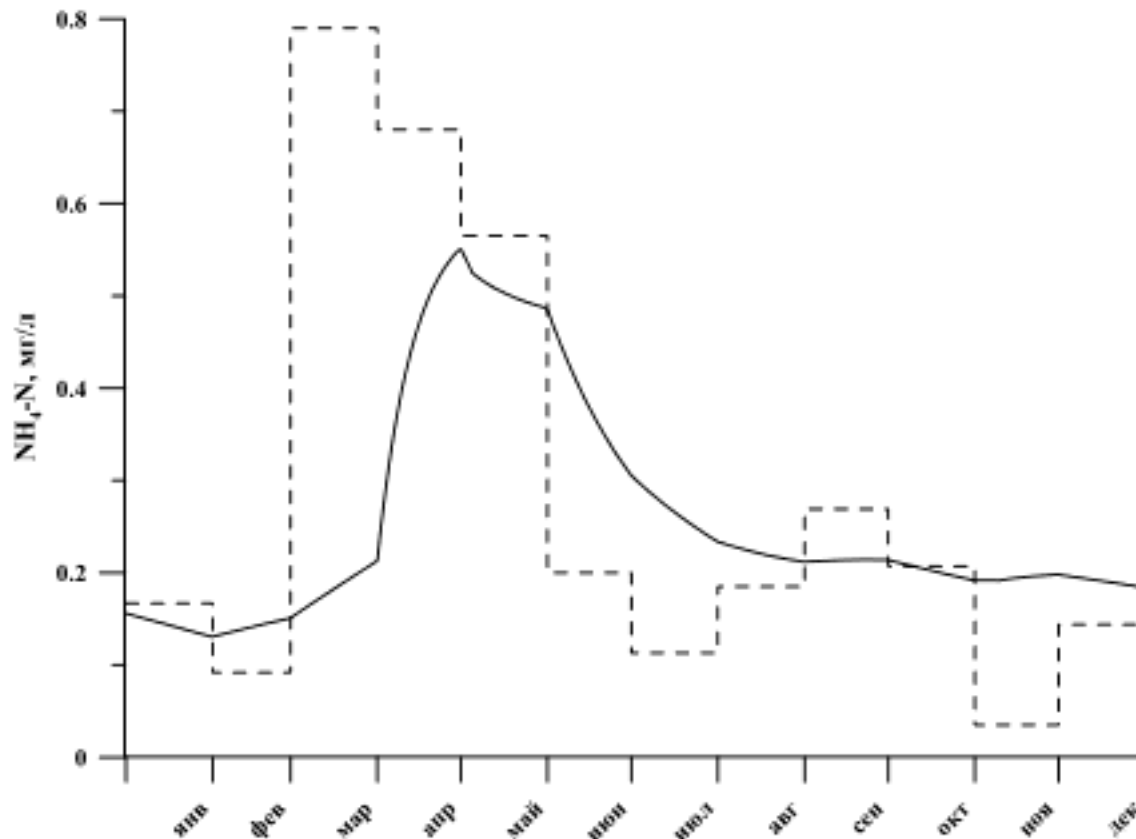


Рис. 1. Аммонийный азот: сплошная линия – расчетные значения концентрации, пунктирная линия – натурные

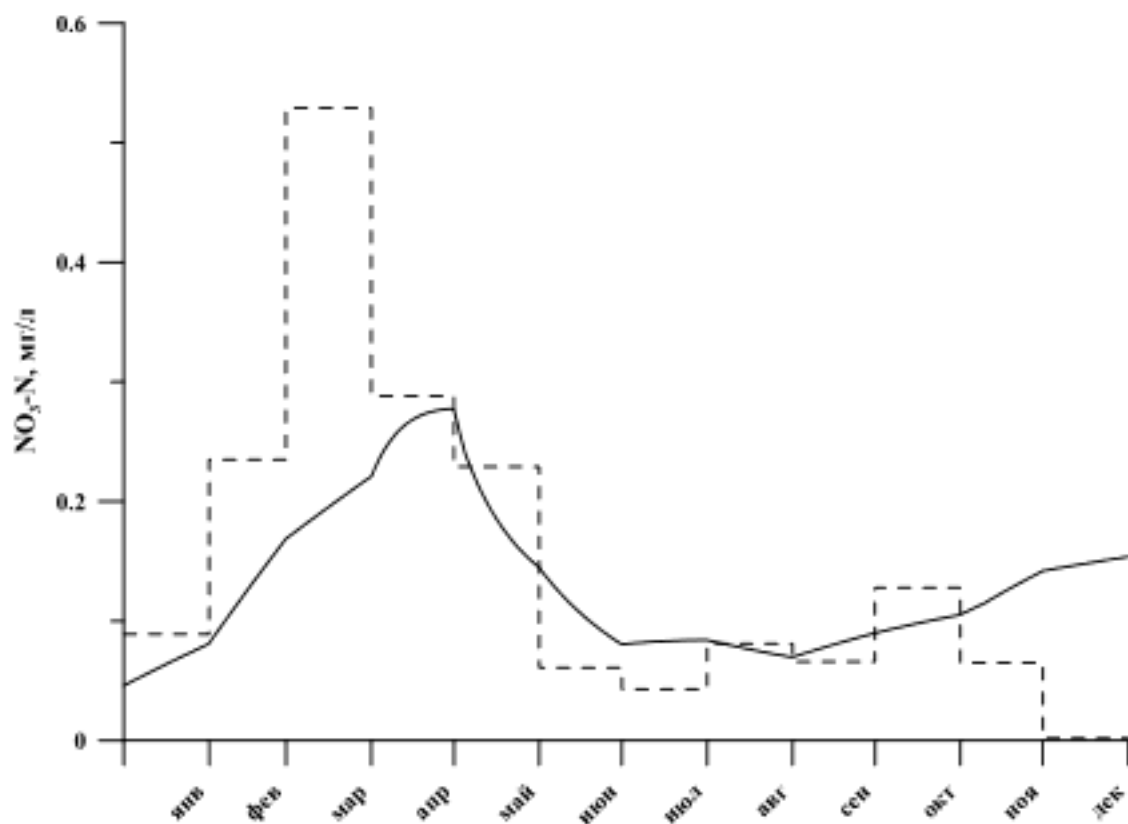


Рис. 2. Нитратный азот: сплошная линия – расчетные значения концентрации, пунктирная линия – натурные

сутствии информации о температуре воды в период ледостава считали ее равной 0°C. Использовались также среднемесячные данные для метеостанции о. Дальний (температура воздуха, облачность, парциальное давление водяного пара, скорость ветра, атмосферное давление, интенсивность атмосферных осадков) [4] и среднемесячные среднееголетние значения приходящей солнечной радиации для ее широты [5].

При расчете качества воды использовались данные суммарного месячного поступления через входной створ (р. Обь в районе г. Камень-на-Оби) следующих примесей: аммонийного азота, нитратного азота, минерального фосфора, органического вещества и фитопланктона (биомасса) [7]. Также брались аналогичные данные по боковым притокам за исключением фитопланктона [8].

Так как для периода с января по апрель данные по фитопланктону отсутствовали, на основании [8-9] было решено задать его поступление через входной створ исходя из концентрации 0,03 мг/л. Приход фитопланктона с водой боковых притоков оценивался из предположения, что их расход равен расходу р. Берди, а его концентрация в них та же, что и на входном створе. Далее масса фитопланктона пересчитывалась в углеродные единицы путем умножения на 0,065 согласно принятым стехиометрическим соотношениям.

Данные о поступлении растворенного кислорода брали из литературных источников [8-10]. В связи с недостаточностью информации предполагалось, что его концентрация на входном створе и в боковых притоках в течение всего расчетного периода

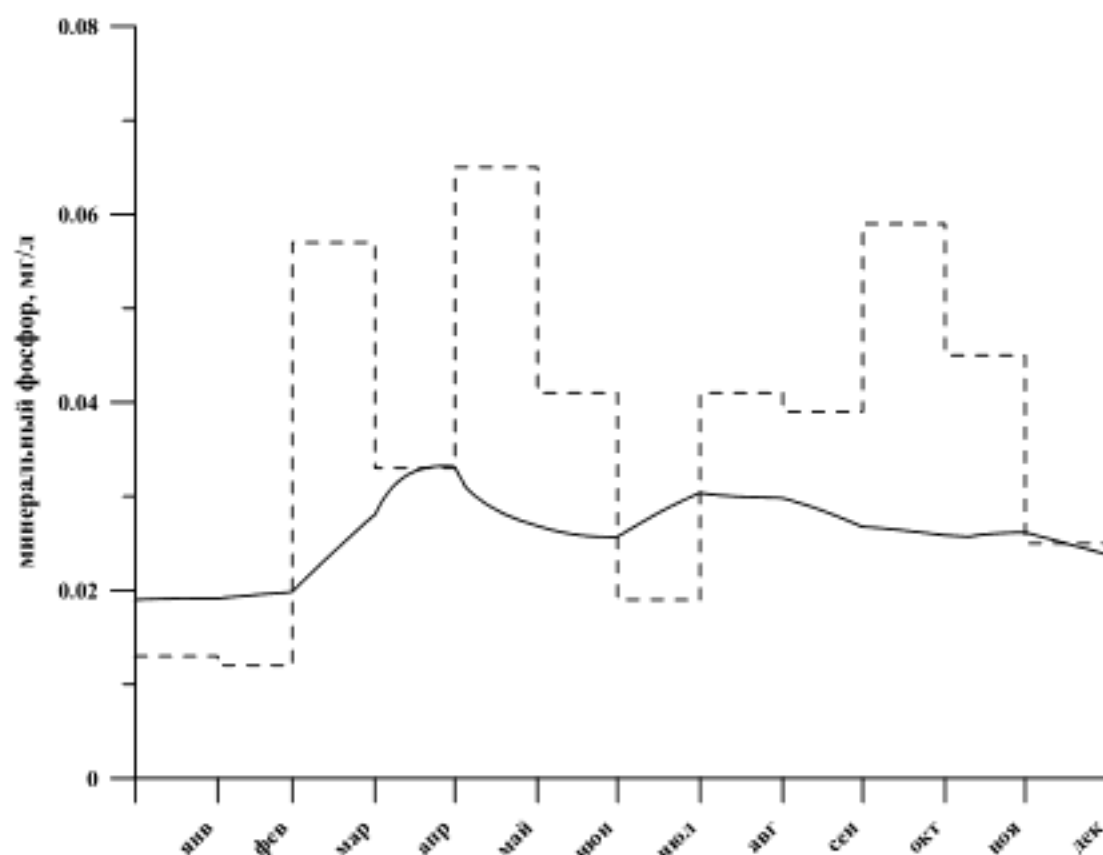


Рис. 3. Минеральный фосфор: сплошная линия – расчетные значения концентрации, пунктирная линия – натурные

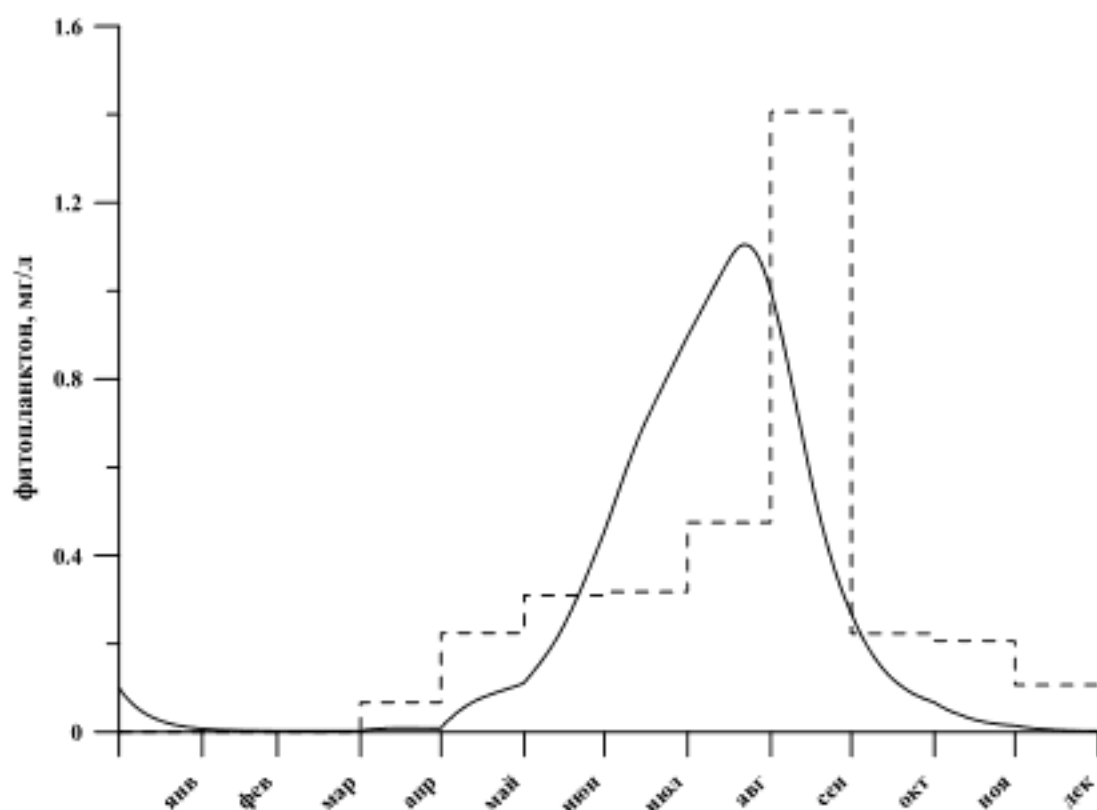


Рис. 4. Биомасса фитопланктона: сплошная линия – расчетные значения концентрации, пунктирная линия – натурные

да составляет 80 % от концентрации насыщения, которая в свою очередь определялась исходя из текущей температуры воды (при этом расход и температура боковых притоков также устанавливалась по р. Берди). Очевидно, точное определение концентрации растворенного кислорода в воде притоков в безледный период имеет меньшее значение, чем для других примесей в силу интенсивного газообмена с атмосферой.

Кроме того, учитывается приведенный в [7] месячный приход примесей с атмосферными осадками (аммонийный и нитратный азот, май-октябрь), с грунтовыми водами (аммонийный азот, органический фосфор, январь-май, сентябрь-декабрь) и из всплывшего льда (аммонийный азот, органический фосфор, апрель-май).

Данные по органическому веществу [7] интерпретировались как БПК_{полн}. Для каждого источника органического вещества помимо БПК, взятого из таблиц [7], также задавались концентрации органического азота и фосфора, которые за неимением другой информации были получены, исходя из использовавшихся стехиометрических коэффициентов для фитопланктона, т.е.:

$$C_7 = \frac{a_{nc}}{a_{oc}} C_5, \quad C_8 = \frac{a_{pc}}{a_{oc}} C_5.$$

В качестве начальных значений брались полусуммы средних концентраций аммонийного азота, нитратного азота, минерального фосфора и БПК за январь и декабрь 1981 г. для замы-

кающего створа водохранилища. Концентрация фитопланктона на начало расчетного периода для того же створа, согласно [8-9], оценивалась как 0,1 мг/л. В остальном начальные параметры примесей задавались аналогично тому, как это было описано выше.

Формирование данных для калибровки и ее результаты

При калибровке расчетные концентрации примесей сравнивались со среднемесячными концентрациями аммонийного азота, нитратного азота, и минерального фосфора для замыкающего створа [7] и среднемесячными концентрациями биомассы фитопланктона для нижнего бьефа [8] (при этом расчетная концентрация фитопланктона пересчитывалась обратно в биомассу). Данные о среднемесячном содержании растворенного кислорода в районе ГЭС отсутствовали, показатели органического вещества для калибровки не использовались в силу их неопределенности.

Такой подход, вообще говоря, не является оптимальным, так как Новосибирское водохранилище – это вытянутый русловый водоем с застойными мелководными зонами. Вследствие этого концентрации примесей существенно различаются по его акватории и в первую очередь по его длине. Поэтому показатели на выходном створе определяются историей прохождения рассматриваемого элементарного объема воды через различные участки водохранилища и не в полной мере отражают текущее среднее содержание примесей в его воде. Например, наиболее выраженный пик цветения фитопланктона может иметь место в районе одного из промежуточных створов, что будет отмечено на замыкающем створе только через значительный промежуток времени, когда вода туда дойдет, причем наблюдаемая биомасса будет существенно ниже.

Тем не менее, использование этого подхода является вынужденным, поскольку приведенные в [7] результаты нескольких маршрутных объездов недостаточно подробны, чтобы дать полную картину распределения примесей по водохранилищу и его изменения во времени, а концентрации примесей на выходном все же дают некоторую интегральную характеристику.

Результаты калибровки модели даны на рис. 1-4. Изначально использовались значения параметров, приведенные в руководстве [1] для эстуария р. Потомак, далее они корректировались в целях достижения наилучшего совпадения результатов расчетов с натурными данными. Также формулы для расчета влияния освещенности на интенсивность фотосинтеза были упрощены по сравнению с приведенными в [1]. Полученные при калибровке значения параметров приведены в таблице. В целом получено удовлетворительное качественное совпадение расчетных значений концентраций с натурными данными. Не очень хорошее количественное совпадение обусловлено, по-видимому, тем, что значения концентраций на замыкающем створе не вполне отображают средние показатели по водохранилищу. Следовательно, более точная калибровка может быть выполнена с помощью пространственно распределенной модели. Интерес представляет также учет процессов в донных отложениях, выделение отдельных групп фитопланктона (в первую очередь сине-зеленых и диатомовых), которые имеют пик цветения в разное время, учет внутрисуточного изменения освещенности. На основании проделанных расчетов можно сделать вывод, что данная модель в основном адекватно описывает изменение качества воды в Новосибирском водохранилище.

В целом получено удовлетворительное качественное совпадение расчетных значений концентраций с натурными данными. Не очень хорошее количественное совпадение обусловлено, по-видимому, тем, что значения концентраций на замыкающем створе не вполне отображают средние показатели по водохранилищу. Следовательно, более точная калибровка может быть выполнена с помощью пространственно распределенной модели. Интерес представляет также учет процессов в донных отложениях, выделение отдельных групп фитопланктона (в первую очередь сине-зеленых и диатомовых), которые имеют пик цветения в разное время, учет внутрисуточного изменения освещенности. На основании проделанных расчетов можно сделать вывод, что данная модель в основном адекватно описывает изменение качества воды в Новосибирском водохранилище.

Библиографический список

1. Ambrose, R.D. WASP5.X A Hydrodynamic and water quality model / R.D. Ambrose, T.A. Wool, J.L. Martin, J.P. Connoly, R.W. Schanz. – Athens, Georgia, USA, 1991.
2. Семчуков, А.Н. Моделирование качества воды Новосибирского водохранилища. Часть 1. Описание модели // Мир науки, культуры и образования. – 2013. – № 2.
3. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1981 г. – Новосибирск, 1984. – Ч. 1. – Т. I. – Вып. 10.
4. Метеорологические ежемесячники. Январь-декабрь 1981 г. – Новосибирск, 1981-1982. – Ч. 2. – Вып. 20.
5. Указания по термическому расчету водохранилищ. – Л., 1969.
6. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1981 г. – Новосибирск, 1982. – Ч. 2. – Т. I. – Вып. 10.
7. Материалы наблюдений по Новосибирскому водохранилищу за 1981 г. – Новосибирск, 1982.
8. Комплексные исследования Новосибирского водохранилища // Труды Западно-сибирского регионального научно-исследовательского института. – М., 1985. – Вып. 70.
9. Отчет по научно-исследовательской работе: анализ экологического состояния Новосибирского водохранилища и его нижнего бьефа; экологическая оценка вариантов ТЭО «Улучшение использования водных ресурсов Новосибирского водохранилища». – Новосибирск, 1992.
10. Гидрохимические бюллетени. Январь-декабрь 1981 г. – Новосибирск, 1981-1982. – № 53-56.

Bibliography

1. Ambrose, R.D. WASP5.X A Hydrodynamic and water quality model / R.D. Ambrose, T.A. Wool, J.L. Martin, J.P. Connoly, R.W. Schanz. – Athens, Georgia, USA, 1991.
2. Semchukov, A.N. Modelirovanie kachestva vodih Novosibirskogo vodokhranilitha. Chastj 1. Opisaniye modeli // Mir nauki, kuljturnih i obrazovaniya. – 2013. – № 2.
3. Gosudarstvenniy vodniy kadastr. Ezhegodniye danniiye o rezhime i resursakh poverkhnostnihkh vod sushi. 1981 g. – Novosibirsk, 1984. – Ch. 1. – T. I. – Vihp. 10.
4. Meteorologicheskie ezhemesyachniki. Yanvarj-dekabrij 1981 g. – Novosibirsk, 1981-1982. – Ch. 2. – Vihp. 20.
5. Ukazaniya po termicheskomu raschetu vodokhranilith. – L., 1969.
6. Gosudarstvenniy vodniy kadastr. Ezhegodniye danniiye o rezhime i resursakh poverkhnostnihkh vod sushi. 1981 g. – Novosibirsk, 1982. – Ch. 2. – T. I. – Vihp. 10.
7. Materialih nablyudeniij po Novosibirskomu vodokhranilithu za 1981 g. – Novosibirsk, 1982.
8. Kompleksniye issledovaniya Novosibirskogo vodokhranilitha // Trudih Zapadno-sibirskogo regionaljnogo nauchno-issledovateljskogo instituta. – M., 1985. – Vihp. 70.
9. Otchet po nauchno-issledovateljskoy rabote: analiz ehkologicheskogo sostoyaniya Novosibirskogo vodokhranilitha i ego nizhnego bjefa; ehkologicheskaya ocenka variantov TEHO «Uluchshenie ispoljzovaniya vodnihkh resursov Novosibirskogo vodokhranilitha». – Novosibirsk, 1992.
10. Gidrokhimicheskie byulleteni. Yanvarj-dekabrij 1981 g. – Novosibirsk, 1981-1982. – № 53-56.

Статья поступила в редакцию 16.05.13