

УДК 504.455

© Е.А.Верещагина^{1,2}, А.Ю.Дворников³, В.Г.Румынин^{1,2}, В.А.Рябченко³, А.М.Никуленков^{1,2}, 2013

¹Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН

²Санкт-Петербургский государственный университет

³Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН

ea.grigorieva@gmail.com

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС НА ГИДРОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ

На основе разработанной трехмерной гидродинамической модели циркуляции воды и эволюции ледяного покрова получены оценки влияния сбросов теплых вод работающего и строящегося энергоблоков Белоярской АЭС на гидротермический режим Белоярского водохранилища. Эффект сброса теплых вод сильнее всего проявляется в окрестности выходов сбросных каналов энергоблоков, где в зимний период образуются полыньи. Рост температуры (до 8°C) в зимний период вблизи водовыпусков при совместной эксплуатации обоих энергоблоков в будущем может неблагоприятно сказаться на функционировании водной экосистемы.

Ключевые слова: Белоярская АЭС, гидродинамическое моделирование, водоем-охладитель.

Нерадиационное воздействие объектов ядерной энергетики на окружающую среду включает ряд факторов: отчуждение земель, сброс теплой воды и загрязняющих веществ в водоемы-охладители, выброс влаги в атмосферу и т.п. При использовании водных объектов в качестве водохранилищ-охладителей атомных электростанций возникает комплекс инженерных, гидрологических и экологических проблем, для решения которых необходимо уметь прогнозировать гидротермический режим этих объектов [1]. Настоящая статья посвящена оценке влияния Белоярской АЭС на гидротермический режим водоема-охладителя (Белоярского водохранилища), оказывающий определяющее воздействие на водную экосистему. Нарушение естественного гидротермического режима объекта ведет к изменениям трофической структуры водоема [1], замещению ценных холоднолюбивых видов рыб теплолюбивыми и эвритермными. Эти процессы широко описаны в литературе [1–6] и учитываются при проектировании и эксплуатации АЭС [7]. В частности, согласно существующим нормам [7], рост температуры воды после ввода в эксплуатацию АЭС не должен превышать 5°C по отношению к естественной фоновой температуре (повышение не более чем до 20°C летом и 5°C зимой) для тех водных объектов, где обитают холодноводные рыбы (лососевые и сиговые).

Из-за почти полного отсутствия данных мониторинга водохранилища решение указанной задачи основано не на обобщении данных наблюдений, а на методах численного моделирования гидротермодинамического состояния водных объектов. Преимущество методов моделирования состоит в уникальной возможности выполнения сценарных расчетов состояния изучаемого объекта при различных комбинациях внешних факторов.

Материалы и методы

Географическое положение. Белоярская АЭС расположена на территории Белоярского района Свердловской области, в 35 км от г.Екатеринбург на водосборе р.Пышмы – берег Белоярского водохранилища.

Естественный водный режим р. Пышмы нарушен влиянием хозяйственной деятельности человека. Река используется как источник технического водоснабжения и как коллектор сточных вод. Белоярское водохранилище создано как водоем-охладитель Белоярской АЭС в 1959–1963 гг. путем зарегулирования стока р. Пышмы в 75 км от истока и является крупнейшим в Свердловской области. Протяженность водоема составляет 20 км, ширина напротив Белоярской АЭС – 3 км. Глубина водоема по фарватеру р. Пышмы достигает 20 м, средняя глубина – 7 м (рис.1, а). В водохранилище впадают реки Пушкариха, Черемшанка, Черная, Марья, Липовка [8]. По критериям, указанным в [9], Белоярское водохранилище может быть отнесено к водоемам рыбохозяйственного значения высшей категории.

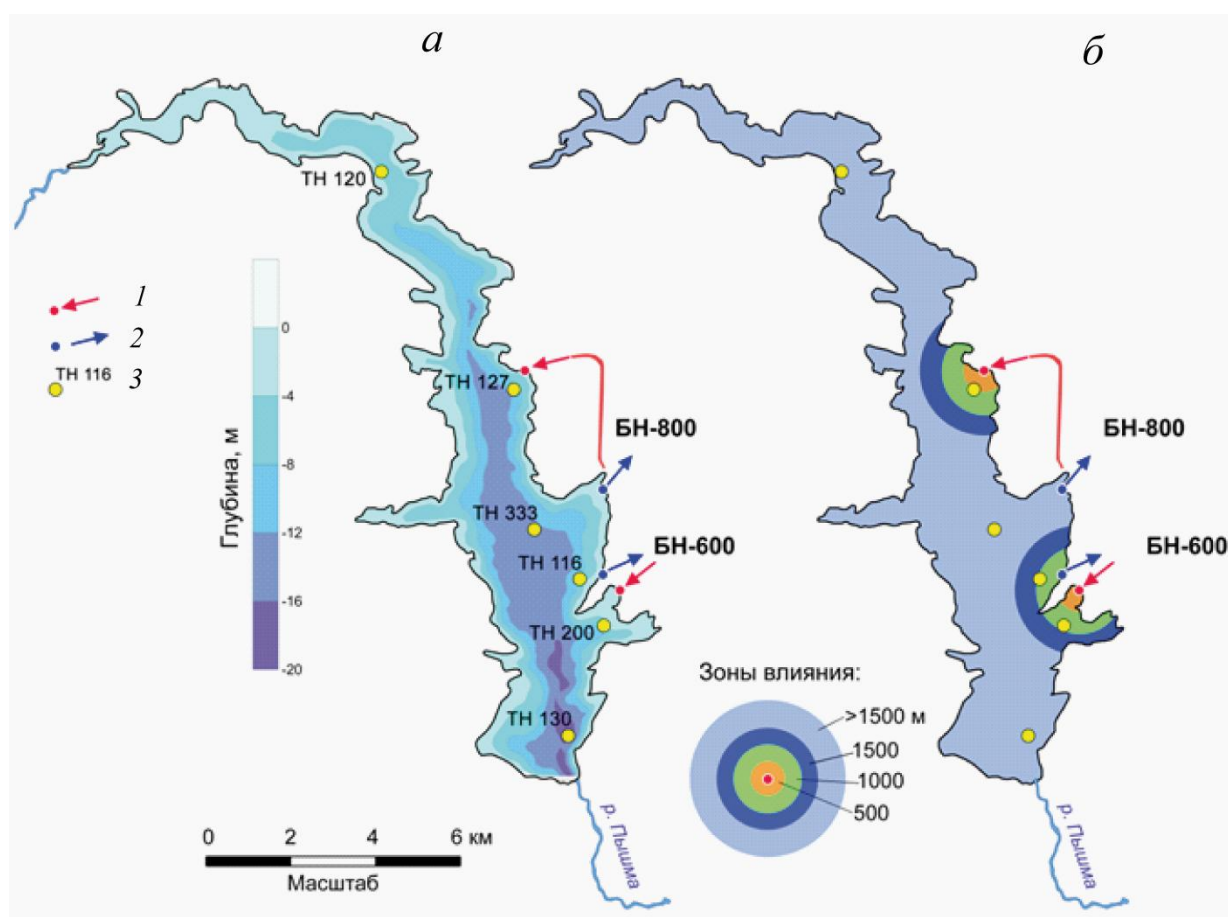


Рис.1. Поле глубин модельной области Белоярского водохранилища (а) и конфигурация условных зон влияния (б).

1 – водовыпуски, 2 – точки водозабора, 3 – характерные точки опробования, выбранные для контроля состояния водоема.

Гидротермический режим. Естественный термический режим Белоярского водохранилища в значительной мере определяется его морфометрическими характеристиками. Сравнительно небольшая глубина обуславливает хороший прогрев водных масс в летний период. Наибольшая (за период наблюдений 1939–1986 гг.) температура поверхности воды составила 23.7°C по среднемесячным значениям, 26.8°C – по средним декадным и 29.0°C – по срочным.

Переход температуры воды через 0°C наблюдается в середине апреля и в начале ноября. Средняя продолжительность периода с температурой более 0°C составляет

196 дней. Наибольшая температура воды наблюдается в июле, иногда в июне и августе. В зимний период (ноябрь–апрель) наблюдается устойчивая температурная стратификация водных масс с ростом температуры с глубиной: температура воды у поверхности близка к 0°C, в придонном слое составляет около 4°C. В мае устанавливается весенняя нейтральная температурная стратификация с температурой, близкой к 4°C. В летний период (июнь–август) на водохранилище наблюдается устойчивая стратификация при падении температуры с глубиной. Наибольшая разность между поверхностной и придонной температурой составляет от 7 до 8°C, градиент температуры в слое скачка – от 1 до 3°C/м, максимальная температура придонного слоя не превышает 13–14°C. К концу лета, с понижением температуры воздуха, в результате конвективного перемешивания устанавливается осенняя нейтральная температурная стратификация. К концу октября температура воды у поверхности понижается до 0°C.

По данным натурных исследований, влияние сброса теплых вод Белоярской АЭС (энергоблок БН-600) на естественный термический режим в основном связывается с южной частью водохранилища. Перепад температур между заборной и сбросной водой составляет от 9 до 12°C. По характеру теплового воздействия на водохранилище обычно выделяют две зоны: ближнюю, расположенную непосредственно у водовыпуска отводящего (сбросного) канала, и дальнюю – остальную часть акватории. (В последующем анализе будет использовано более детальное пространственное деление).

Ближняя зона невелика по своим размерам, ее границы не постоянны и зависят в основном от тепловой нагрузки АЭС. В период ледостава в районе сброса теплых вод ежегодно наблюдается полынья, размеры и очертания которой зависят от тепловой нагрузки станции, температуры окружающего воздуха, силы и направления ветра. В дальней зоне помимо тепловой нагрузки АЭС и течения, вызванного сбросом и забором воды для охлаждения реакторных установок АЭС и направленного от водовыпуска к водозабору, существенное влияние на формирование поля температуры оказывают также течения, ветровое перемешивание и тепло- и влагообмен с атмосферой.

В настоящее время, по оценкам, площадь части водоема, занимаемая подогретой водой, температура которой превышает естественную на 5°C, составляет до 1 км² или около 3 % площади Белоярского водохранилища.

Течения в Белоярском водохранилище определяются в большей степени ветровым воздействием и сбросом/забором воды для охлаждения, в меньшей – речным стоком и горизонтальными неоднородностями распределения температуры.

Модель. Для прогнозирования воздействия на экосистему Белоярского водохранилища дополнительных сбросов в него подогретых вод, участвующих в оборотном цикле строящейся энергоблока (БН-800), была использована трехмерная гидродинамическая модель РОМ, адаптированная к условиям изучаемого объекта [10]. Модель РОМ, использующая вертикальную σ -координату, разработана в Принстонском университете. Модель включает несколько сопряженных модулей, описывающих циркуляцию воды в бассейне, вертикальную и горизонтальную турбулентность, распространение гидродинамически пассивных растворенных веществ и взвесей (с учетом гравитационного оседания), формирование и эволюцию ледового покрова (параметризация перечисленных процессов основана на работах [11–14]).

Указанная модель СПбФ ИОРАН успешно использовалась для расчета циркуляции и распространения шлейфов сточных вод в Невской губе в различных гидрометеорологических условиях [15–19].

Модель была адаптирована к условиям Белоярского водохранилища. Модельная сетка покрывает водохранилище с шагом по горизонтали 70 м. Число равномерно расположенных σ -уровней равно 13 (верхний совпадает с поверхностью воды, нижний – с дном). При построении поля глубин и береговой линии использован картографический

материал (топографические карты масштаба 1:25 000, спутниковые данные). Значения глубин сняты с карт с помощью пакета Golden Software Digger 3. Поля глубин описаны для нормального подпорного уровня водохранилища (212.0 м БС) [20].

Гидродинамическая модель циркуляции воды и льда приводится в движение атмосферными воздействиями, речным стоком и потоками воды в точках водозабора и водовыпуска АЭС.

Атмосферные воздействия. Задание атмосферных воздействий на водной поверхности осуществляется в соответствии с рекомендациями [21] и дополнительным учетом суточного цикла коротковолновой радиации. Напряжение трения на поверхностях раздела воздух–вода рассчитывается в зависимости от скорости ветра по квадратичному закону сопротивления, поток тепла – из уравнения теплового баланса поверхности. Уходящая длинноволновая радиация, турбулентные потоки явного и скрытого тепла параметризуются линейными функциями разницы температур приземного воздуха и поверхности воды. Поток влаги на свободной поверхности воды задается как разность осадки минус испарение.

Необходимые для расчета атмосферных воздействий характеристики (скорость и направление ветра, облачность, осадки, температура и влажность воздуха в приземном слое) задаются по данным метеостанции «Верхнее Дуброво» с временным разрешением, равным 6 ч. Эти данные взяты из архива погоды (www.rp5.ru).

Речной сток. На жидких боковых границах в случае втекающего потока (р.Пышма) задаются (с суточным временным разрешением) значения расхода и температуры воды. Из-за отсутствия регулярных наблюдений в верховьях реки ежедневный расход воды для гидрологического поста р.Пышма – пос.Сарапулка – рассчитан по методике [22]. Естественный термический режим верховьев р.Пышмы в настоящее время не изучается. Температура воды, поступающей в Белоярское водохранилище, задана по данным [8].

Уровень воды в водохранилище поддерживается постоянным (нормальный подпорный уровень) за счет стока через шлюзы гидротехнических сооружений, расположенных на южной оконечности водохранилища.

Другие граничные условия. На дне бассейна вертикальная компонента скорости течений и нормальные к поверхности дна потоки тепла полагаются равными нулю. Придонное напряжение трения параметризуется как функция горизонтальной скорости на ближайшем к дну модельном уровне. На твердых боковых границах (берегах) бассейна задаются условия прилипания для горизонтальной скорости течений и отсутствия нормального к границе потока тепла.

Начальные условия. Расчеты выполнены на два года для метеорологических условий 2009–2010 гг., которые являются достаточно характерными для данного региона. В начальный момент времени (01.01.2009 г.) скорость течений и распределение пассивной примеси в модельной области принимаются равными нулю. Первый год счета необходим для адаптации модели к внешним воздействиям и ликвидации возмущений в решении, вызванных начальными условиями. Поскольку как динамический, так и термический режим Белоярского водохранилища устанавливается достаточно быстро (в течение первых суток), полученное решение второго года можно считать установившимся.

Сценарии. Для прогнозных оценок воздействия действующего (БН-600) и строящегося (БН-800) энергоблоков Белоярской АЭС на экосистему водоема-охладителя (Белоярского водохранилища) были разработаны три модельных сценария. Они дифференцируются в зависимости от условий поступления в Белоярское водохранилище природных (речных) и технических (через отводные каналы АЭС) вод со стороны береговой линии.

Сценарий 1 («фоновый»). Предполагает воспроизведение естественного состояния водоема до начала строительства и эксплуатации объектов атомно-энергетического ком-

плекса: влияние Белоярской АЭС на водохранилище полностью отсутствует (сбросные каналы не работают).

Сценарий 2 (современная ситуация). Предполагается, что функционирует только действующий энергоблок БН-600. В расчетах используются проектные данные эксплуатации этого энергоблока, включая параметры процесса охлаждения (см.[23]).

Сценарий 3 (прогнозный). Данный сценарий подразумевает ввод в эксплуатацию энергоблока БН-800. При этом считается, что, как и в сценарии 2, энергоблок БН-600 функционирует согласно проектному режиму эксплуатации [23]. Воздействие энергоблока БН-800 на водохранилище моделируется путем задания дополнительного источника сбросных вод.

Температура и расход сбросных/заборных вод. Места забора и сброса воды для энергоблока БН-600 Белоярской АЭС отделены друг от друга выступающим вперед мысом (рис.1), что обеспечивает более низкие температуры заборной воды. Согласно проекту, в состав сооружений технического водоснабжения энергоблока БН-800 входят открытые подводящий и отводящий каналы, что также благодаря достаточно большому разнесению мест сброса и забора воды обеспечивает сравнительно низкую температуру заборной воды. По проекту, термический режим сбросных вод энергоблока БН-800 на выходе со станции такой же, как и для энергоблока БН-600 [23].

Данные мониторинга температуры воды на сбросе с действующей станции БН-600 (T_c) и в водозаборе (T_3) позволили выявить закономерности термического режима системы охлаждения реакторных установок. Как видно (рис.2, а), прирост температуры $\Delta T = T_c - T_3$ после прохождения воды через реакторное отделение носит сезонный характер: ΔT повышается в холодный период времени и понижается в теплый. При этом зависимость $T_c = f(T_3)$ практически линейна (рис.2, б) и аппроксимируется формулой

$$T_c(t) = a_1 T_3(t) + \Delta T_1, \tag{1}$$

где $a_1 = 0.84$, $\Delta T_1 = 12.41^\circ\text{C}$.

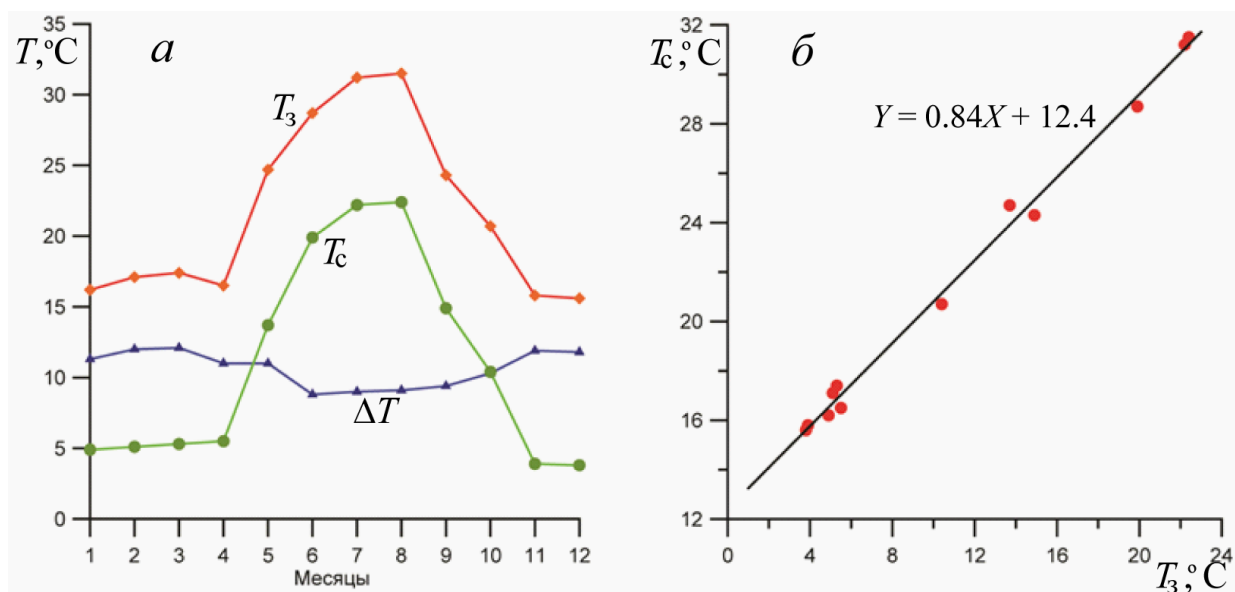


Рис.2.Сезонный ход температуры заборной (T_3) и сбросной (T_c) воды для энергоблока № 3 Белоярской АЭС с реактором БН-600.

а – среднемесячные T_3 и T_c и разница этих температур; б – линейная связь между T_3 и T_c .

Известно, что расход воды в системе охлаждения Q_x регулируется с учетом сезонных изменений температуры T_3 . Если исходить из предположения о постоянстве теплового потока $Q_{cp}\Delta T_{cp}$ (Q_{cp} – средний годовой расход, ΔT_{cp} – средний годовой перепад температур), идущего на охлаждение рабочей зоны реактора, то имеет место равенство

$$[T_c(t) - T_3(t)]Q_x(t) = [a_1T_3(t) + \Delta T_1 - T_3(t)]Q_x(t) = Q_{cp}\Delta T_{cp}, \quad (2)$$

откуда следует, что

$$Q_x(t) = \frac{Q_{cp}\Delta T_{cp}}{[\Delta T_1 - (1 - a_1)T_3(t)]}. \quad (3)$$

Полагая $Q_{cp} = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ и $\Delta T_{cp} = 10.4^\circ\text{C}$, получаем формулу для определения расхода сбросных/заборных вод:

$$Q_x(t) = \frac{208}{[12.41 - 0.16T_3(t)]}. \quad (4)$$

Формула (4) использовалась при задании расхода сбросных/заборных вод в сценарии 2. По предположению, соотношение (2) справедливо и при эксплуатации энергоблока БН-800 (сценарий 3). В этом случае, согласно проектной документации, $Q_{cp} = 24 \text{ м}^3/\text{с}$ и расход сбросных/заборных вод рассчитываются по формуле

$$Q_x(t) = \frac{250}{[12.41 - 0.16T_3(t)]}. \quad (5)$$

Приведенные здесь корректировочные процедуры имеют принципиальное значение с точки зрения повышения точности расчетов. Поскольку температура сбросной воды рассчитывается по температуре заборной воды (см.(1)), то это позволяет учесть влияние сброса на водозабор, а также двух энергоблоков друг на друга в сценарии 3.

Отметим, что температура и расход сбросной воды рассчитываются на каждом временном шаге, что позволяет корректно описать «разогрев» резервуара-охладителя.

Результаты. В последующем анализе существующих и возможных в будущем термических изменений в Белоярском водохранилище используются рассчитанные по указанным выше сценариям поля температуры, причем специально выделяются зоны различного влияния АЭС, окружающие водовыпуски энергоблоков БН-600 и БН-800 (рис.1, б), а именно: 1) ближняя зона, расположенная в пределах 0–500 м от водовыпусков; 2) промежуточная – в пределах 500–1000 м; 3) дальняя – в пределах 1000–1500 м и 4) акваториальная, покрывающая остальную часть акватории водохранилища за исключением 1500-метровых окрестностей двух водовыпусков. В дальнейшем под температурой зоны понимается средняя температура (в пределах зоны от поверхности до дна).

Оценка современного влияния АЭС на термический режим водохранилища. Рассчитанная поверхностная температура в Белоярском водохранилище в фоновом сценарии 1 в период отсутствия льда (май–ноябрь) характеризуется слабо меняющимися по акватории распределениями. К неоднородностям этих распределений можно отнести: 1) понижение температуры в окрестности притока р.Пышмы и в центральной части водохранилища и 2) повышение температуры воды на несколько градусов у берегов, особенно в небольших бухточках по всей акватории водохранилища. Льдообразование в водохранилище начинается в декабре. Лед практически всю зиму покрывает его поверхность полностью и является припайным, толщина его достигает в конце марта 95 см. Полностью лед исчезает в конце апреля.

Таблица 1

**Среднемесячная температура (в °С) и ее отклонение от фоновых значений
(сценарий 2 минус сценарий 1) при работе одного энергоблока БН-600
в окрестностях его водовыпуска**

Зона, м	Месяц												Годовая $T_{\text{ср}}$, °С
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
< 500	6.6	7.2	7.6	11.1	18.0	23.1	25.4	26.3	21.0	16.3	11.6	6.4	15.0
	6.6	7.2	7.6	10.9	7.1	5.1	4.8	5.2	6.1	7.7	8.5	6.2	6.9
500–1000	1.5	1.7	1.9	5.2	13.2	18.8	21.7	22.6	17.0	11.7	6.4	1.3	10.2
	1.5	1.7	1.9	5.1	4.2	2.0	1.5	1.5	1.6	2.2	2.8	0.90	2.2
1000–1500	1.6	1.8	1.9	4.6	12.2	18.0	21.2	22.1	16.6	11.1	5.6	1.4	9.8
	1.6	1.8	1.9	4.5	3.9	1.9	1.3	1.2	1.2	1.4	1.7	0.8	1.9
>1500	1.1	1.2	1.3	3.4	12.0	17.8	21.0	21.7	15.8	10.0	4.4	1.0	9.2
	1.0	1.2	1.3	3.3	3.4	1.6	1.0	0.9	0.8	0.9	0.8	0.4	1.4

В случае работающего энергоблока БН-600 (сценарий 2) картина резко меняется (рис.3 и 4 (см.цв.вклейку), табл.1). В окрестности выхода сбросного канала энергоблока БН-600 Белоярской АЭС образуется область повышенной (по сравнению с фоновой) температуры: в 500-метровой зоне температура повышается почти на 7°С в среднем за год и испытывает заметный сезонный ход (от максимального увеличения на 10,9°С в апреле до минимального увеличения на 4,8°С в июле). В зонах 500–1000 и 1000–1500 м среднегодовое повышение температуры составляет 2.2 и 1.9°С соответственно; максимальное повышение температуры также приходится на апрель. Последний факт объясняется тем, что в апреле достигается минимальная разность температур вода–воздух и теплоотдача в атмосферу для открытой воды оказывается минимальной, это способствует нагреву воды в водохранилище.

Отметим, что в сценарии 2 температура воды в окрестностях планируемых точек водозабора и водосброса энергоблока БН-800 повышается слабо (рис.3 и 4, слева), что указывает на слабое влияние сброса тепла с энергоблока БН-600 на температурный режим водоема вблизи этих точек.

Согласно результатам расчетов, отличительной чертой ледового режима в современной ситуации является полынья, существующая в течение всего зимнего периода в окрестности выхода сбросного канала энергоблока БН-600. Эта полынья почти всегда включает в себя все три зоны (0–500, 500–1000 и 1000–1500 м); ее размеры в марте достигают 1.5–2 км². Размеры полыньи увеличиваются начиная с конца марта, в конце апреля озеро полностью освобождается ото льда.

Сопоставление рассчитанного распределения температуры воды на поверхности Белоярского водохранилища при работающем энергоблоке БН-600 с аналогичными распределениями, полученными по немногочисленным снимкам спутников Landsat и GeoEye в различные сезоны 2010 г., свидетельствует о хорошем согласовании модельных результатов и спутниковых данных (см., напр., рис.3, на котором приведено подобное сравнение для 10 октября 2010 г.). В частности, фактические контуры полыньи, восстановленные по спутниковым снимкам, подобны ее расчетным контурам в течение всего зимнего периода, за исключением периода ледотаяния, когда модель завышает размеры полыньи.

Прогноз влияния будущей АЭС на термический режим водохранилища (сценарий 3). Эффект сброса теплых вод АЭС в Белоярское водохранилище в случае работы двух энергоблоков (БН-600 и БН-800) заметно превышает эффект от работы одного БН-600 в течение всего года (см.рис.4). Как видно, при совместной эксплуатации энергоблоков БН-600 и БН-800 область повышенной температуры охватывает не только южную,

но и центральную часть водохранилища. Согласно данным табл.2, средний годовой рост температуры (относительно фоновой) в зонах 0–500, 500–1000 и 1000–1500 м около водовыпуска энергоблока БН-800 составляет 4.7, 3.7 и 3.3°C соответственно. В этом случае температура с удалением от места сброса тепла изменяется более плавно, чем в окрестности водовыпуска энергоблока БН-600 (ср. табл.1 и 2). Указанная разница в распределении температур обусловлена различием в конфигурации береговой линии вблизи рассматриваемых мест сброса тепла, а именно: сбросный канал энергоблока БН-600 выходит в узкую бухту, ограниченную на севере и юге мысами, препятствующими распространению тепла в открытую часть водохранилища, тогда как сбросный канал энергоблока БН-800 выходит в водохранилище на слабоизрезанной береговой линии, и сбрасываемая теплая вода попадает прямо в открытую воду водоема. Как и в современный период (сценарий 2), максимальный рост (относительно фона) температуры в водоеме наблюдается в весенний период (апрель), во время таяния льда.

Согласно результатам расчета, эксплуатация энергоблока БН-800 приводит к незначительному увеличению (на 0.8°C в среднем за год) температуры вблизи водозабора энергоблока БН-600. Дополнительный нагрев зон 0–500, 500–1000 и 1000–1500 м в районе водосброса энергоблока БН-600 в среднем за год составляет около 0.9°C (табл.3).

В зимний период сброс теплой воды от энергоблока БН-800 приведет к образованию новой полыньи. Ее размеры будут сопоставимы с размерами полыньи, существующей у выхода сбросного канала энергоблока БН-600. При совместной работе двух энергоблоков акватория Белоярского водохранилища освободится ото льда в 10-х числах апреля, что на 15–20 дней раньше, чем при работе одного энергоблока БН-600.

Таблица 2

Среднемесячная температура (в °С) и ее отклонение от фоновых значений (сценарий 3 минус сценарий 1) при совместной работе энергоблоков БН-600 и БН-800 в окрестностях водовыпуска энергоблока БН-800

Зона, м	Месяц												Годовая $T_{ср}$, °С
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
< 500	5.2	5.3	5.8	8.6	15.1	20.1	22.9	23.8	18.2	13.0	8.1	4.5	12.6
	5.2	5.3	5.8	8.5	6.4	3.7	3.1	2.9	3.0	3.8	4.6	4.1	4.7
500–1000	3.3	3.7	4.2	7.7	14.2	19.4	22.4	23.3	17.6	12.2	7.1	2.5	11.5
	3.3	3.7	4.2	7.6	6.0	3.4	2.7	2.5	2.5	3.1	3.5	1.9	3.7
1000–1500	2.7	2.9	3.5	7.3	14.0	19.2	22.3	23.1	17.4	11.9	6.6	2.2	11.1
	2.7	2.9	3.5	7.2	5.8	3.3	2.5	2.4	2.3	2.8	2.9	1.6	3.3
>1500	1.8	1.9	2.0	6.2	14.1	19.2	22.2	22.8	16.9	11.2	5.5	1.5	10.4
	1.8	1.9	2.0	6.0	5.4	3.0	2.2	2.0	1.8	2.0	1.9	0.9	2.6

Таблица 3

Отклонения среднемесячной температуры (в °С) в сценарии 3 (совместная работа энергоблоков БН-600 и БН-800) от ее значений в сценарии 2 (работа одного энергоблока БН-600) в окрестностях водовыпуска энергоблока БН-600

Зона, м	Месяц												Годовая $T_{ср}$, °С
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
< 500	0.88	0.71	0.39	1.65	1.53	1.03	0.94	0.87	0.69	0.65	0.45	0.38	0.85
500–1000	0.57	0.54	0.40	2.17	1.78	1.20	1.03	0.97	0.76	0.75	0.59	0.29	0.92
1000–1500	0.55	0.51	0.42	1.97	1.91	1.30	1.07	0.99	0.79	0.80	0.77	0.29	0.95
>1500	0.82	0.78	0.87	2.82	1.99	1.37	1.16	1.11	1.02	1.18	1.16	0.56	1.24

Более точное представление о пространственном распределении эффекта сброса теплых вод в водохранилище в случае работы двух энергоблоков АЭС дает рис.5 (см.цв.вклейку), на котором представлен годовой ход температуры поверхности воды в шести контрольных точках (на рисунке – ТН), расположенных в характерных местах водоема (см.рис.1): в береговой зоне или в центре водохранилища, напротив мест водозабора и водосброса, в северной и южной оконечностях водохранилища. Как видно, во всех точках отмечается рост температуры по сравнению с фоновым сценарием. Даже в самой удаленной точке ТН 120, расположенной в северной части водохранилища, в 6 км от сбросного канала энергоблока БН-800, температура поверхности воды заметно превышает фоновую (более чем на 0.2°C) в течение 7 мес. Максимальные отличия от фоновых температур связаны с периодом снеготаяния и достигаются в середине марта–начале мая, минимальные различия отмечаются в летний период (июль–сентябрь). Максимальный рост температуры происходит в точках, расположенных в окрестности водовыпусков (ТН 127 и 200).

На основе разработанной трехмерной гидродинамической модели Белоярского водохранилища получены количественные оценки влияния на гидротермический режим водохранилища: 1) работающего энергоблока БН-600 Белоярской АЭС, 2) строящегося энергоблока БН-800 после ввода его в эксплуатацию и 3) энергоблоков БН-600 и БН-800 в случае их совместной эксплуатации.

Эффект сброса теплых вод АЭС в водохранилище сильнее всего проявляется в окрестности водовыпусков энергоблоков, вокруг которых образуется область повышенной температуры (относительно фоновых значений, соответствующих полному отсутствию тепловых сбросов АЭС). Показано, что увеличение температуры на большей части водохранилища (вне 1500-метровой окрестности водовыпусков) за счет сброса теплой воды при работе одного энергоблока БН-600 составляет 1.4°C (табл.1), тогда как в случае работы двух энергоблоков (БН-600 и БН-800) это увеличение достигает 2.6°C (табл.2).

Анализ результатов моделирования позволил выделить в годовом ходе три периода с характерными диапазонами изменения температуры воды: поздне-осенний–зимний (ноябрь–февраль); весенний (март–май) и летний–ранне-осенний (июнь–октябрь). Установлено, что максимальный рост температуры (относительно фоновой) наблюдается в весенний период, во время таяния снежно-ледяного покрова. Эффект сброса теплых вод АЭС в Белоярское водохранилище в случае работы двух энергоблоков (БН-600 и БН-800) заметно усиливается как в летний период, при отсутствии льда, так и в зимний.

Рассчитанные изменения температуры воды в водохранилище важны для оценки возможных изменений в функционировании водной экосистемы при вводе в эксплуатацию энергоблока БН-800. Отметим, в частности, что неблагоприятное воздействие на экосистему водоема может оказать рост температуры (до 8°C) вблизи водовыпусков в зимний период.

При написании статьи были использованы методические материалы, разработанные в рамках проекта «Расширенная трехуровневая, основанная на компетентном подходе учебная программа в области прикладных морских наук (eMaris)» программы ТЕМПУС (номер проекта-517271-TEMPUS-1-201M-DE-TEMPUS-JPCR).

Литература

1. Макаров И.И. и др. Моделирование гидротермических процессов водоемов-охладителей ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с.
2. Баранаскене А.М., Будрене С.Ф., Каспиравичене Ю.Р. Состояние фито-, зоо- бактериопланктона и продукционно-деструкционные процессы в водоеме-охладителе Игналинской АЭС // Экология регионов атомных станций. М., 1994. С.213–254.

3. Безносков В.Н., Кучкина М.А., Суздалева А.Л. Исследование процесса термического эвтрофирования в водоемах-охладителях АЭС // Водные ресурсы. 2002. Т.29, № 5. С.610–615.
4. Веригин Б.В. О явлении термического эвтрофирования водоемов // Гидробиол. журн. 1977. Т.13, № 5. С.98–105.
5. Мордохай-Болтовской Ф.Д. Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов: (обзор) // Экология организмов водохранилищ охладителей. Л., 1975. С.7–70.
6. Сергеева О.А., Калиниченко Р.А., Ленчина Л.Г., Медяник Е.В. Влияние системы охлаждения тепловой электростанции на планктон // Гидробиол. журн. 1989. Т.25, № 6. С.37–42.
7. Приказ Министерства природных ресурсов от 17.12.2007 г. № 333 «Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей».
8. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1, вып.11: Бассейн Иртыша. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1985.
9. Приказ Федерального агентства по рыболовству от 17.09.2009 г. № 818 «Об установлении категории водных объектов рыбохозяйственного значения и особенностей добычи (вылова) ВБР, обитающих в них и отнесенных к объектам рыболовства».
10. Blumberg A.F. et al. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model / Ed. N.Heaps // Three-dimensional Coastal Ocean Models. Amer. Geophys. Union, 1987. 208 p.
11. Mellor G.L. et al. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. and Space Phys. 1982. V.20. P.851–875.
12. Smagorinsky J. et al. Numerical results from a nine level general circulation model of the atmosphere // Monthly Weather Review. 1965. V.93. P.727–768.
13. Naapala J. et al. A numerical study of open water formation in sea ice // J. Geophys. Res. 2005. V.110 (C9). P.1–17: doi: 10.1029/2003JC002200. ISSN: 0148-0227.
14. Van Rijn L.C. Sediment transport, Part II: Suspended load transport // J. Hydraul. Eng. 1984.V.110, N11. P.1613–1641.
15. Ryabchenko V. et al. Modelling ice conditions in the easternmost Gulf of Finland in the Baltic Sea // Continental Shelf Res. 2010. V.30. P.1458–1471.
16. Рябченко В.А. и др. Оценка изменения качества воды Невской губы после введения в эксплуатацию Юго-западных очистных сооружений Санкт-Петербурга (по данным математического моделирования) // Изв. РГО. 2006. Т.138, вып.5. С.48–57.
17. Кармазинов Ф.В. и др. Оптимизация расположения водовыпусков очистных сооружений как способ оздоровления акватории Невской губы / Под ред. В.А.Румянцева, С.А.Кондратьева // Теория и практика восстановления внутренних водоемов. СПб., 2007. С.167–179.
18. Рябченко В.А. и др. Прогноз погоды и состояния водных объектов Северо-Западного региона России на базе комплекса гидродинамических моделей. СПб.: Нестор-История, 2008. 60 с.
19. Румянцев В.А. и др. Исследование распространения шлейфов сточных вод на акватории крупного водоема // Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: Новые методы и технологии исследований. Казань: Изд-во КГУ, 2009. С.200–204.
20. Схема комплексного использования и охраны водных и земельных ресурсов в бассейне р.Пышмы на период 1990 г. Свердловскгипроводхоз, 1981.
21. Parkinson C.L. et al. A large-scale numerical model of sea ice // J. Geophys. Res. 1979. V.84 (C1). P.311–337.
22. СП 33-101-2003 Определение расчетных гидрологических характеристик. М., 2004.
23. Белоярская АЭС. Блок 4. Окончательный отчет по обоснованию безопасности» БЛ.4-0-0-ОООБ-001/2, ОАО «СПбАЭП». СПб, 2011.

Статья поступила в редакцию 05.04.2013 г.

